

PROJETO DE GRADUAÇÃO

Avaliação do Efeito Térmico no Limite de Resistência à Tração da Liga 6201 Utilizada em Cabos Condutores

Por,
Fábio Pereira Santos

Brasília, 23 de novembro de 2016

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica

PROJETO DE GRADUAÇÃO

Avaliação do Efeito Térmico no Limite de Resistência à Tração da Liga 6201 Utilizada em Cabos Condutores

POR,

Fábio Pereira Santos

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção
do grau de Engenheiro Mecânico.

Banca Examinadora

Prof. Daniel Monteiro Rosa, UnB/ ENM (Orientador)

Prof. Edgar Nobuo Mamiya, UnB/ ENM

Prof. Edson Paulo da Silva, UnB/ ENM

Brasília, 23 de novembro de 2016

RESUMO

O objetivo desse trabalho é quantificar a diminuição da resistência à tração em cabos condutores de alumínio liga 6201, bem como compreender quais mecanismos atuam na redução desse parâmetro. A partir de tratamentos térmicos realizados em dois modelos de cabos de alumínio liga 6201, foi possível simular o efeito gerado pelas sobrecargas. Dessa forma, foram quantificadas as perdas de resistência mecânica apresentadas pelos cabos por meio de ensaios destrutivos de tração. A análise da morfologia da falha e das alterações metalográficas do material (diminuição das fases da liga) permitiu observar modificações na estrutura química e na ductilidade dos arames, que podem ter influenciado nas perdas de resistência da liga. Tais resultados possibilitaram as discussões que estão presentes ao longo deste estudo.

ABSTRACT

The goal of this essay is to quantify the tensile strength decrease in alloy 6201 aluminum conductor cables, as well as to understand which mechanisms contribute to reducing this parameter. From thermal treatments performed on two models of alloy 6201 aluminum cables, it was possible to simulate the effect generated by the overloads. Thus, we quantify the mechanical resistance losses presented by the cables through destructive traction assays. The analysis of the morphology of the ductile failure and metallographic alterations of the material (decrease of the alloy sample phases) allowed observing modifications on both chemical structure and ductility of the wire, which may have influenced on the alloy resistance losses. These results made possible the discussions presented throughout this study.

Sumário

<i>Lista de Figuras</i>	<i>vi</i>
<i>Lista de Tabelas.....</i>	<i>ixx</i>
<i>Lista de Símbolos.....</i>	<i>xix</i>
<i>Lista de Abreviações</i>	<i>xiiix</i>
Capítulo 1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Histórico.....	1
1.2 Contexto de Desenvolvimento do Trabalho	1
1.3 Objetivos.....	3
1.4 Metodologia.....	3
1.5 Justificativa para a Realização do estudo.....	5
Capítulo 2 EMBASAMENTO TEÓRICO.....	8
2.1 Introdução.....	8
2.2 Definições.....	8
2.3 Ensaio de Tração.....	9
2.4 Análise Estatística.....	12
2.4.1 Variáveis Aleatórias.....	12
2.4.2 Média Aritmética	12
2.4.3 Desvio-Padrão.....	12
2.5 O Uso da Liga 6201 na Fabricação de Cabos Condutores	13
2.6 Envelhecimento Artificial	14
2.7 Fabricação dos Cabos de Alumínio Liga 6201	13
Capítulo 3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	20
3.1 Introdução.....	20
3.2 Cabo condutor.....	20
3.3 Tratamentos Térmicos.....	21
3.4 Ensaaios de Tração.....	22

3.5 Caracterização Topográfica das Falhas.....	27
3.6 Fractografia.....	27
3.7 Metalografia.....	28
3.8 Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS).....	30
Capítulo 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	31
4.1 Introdução.....	31
4.2 Resultados dos Ensaios de Tração.....	31
4.3 Resultados da Caracterização Topográfica	33
4.4 Resultados da Fractografia.....	36
4.5 Resultados da Metalografia.....	43
4.6 Resultados da Espectroscopia de Energia Dispersiva.....	48
Capítulo 5 CONCLUSÃO	51
Referências Bibliográficas	52
Apêndice A	54
Apêndice B.....	56
Apêndice C.....	92

Lista de Figuras

Figura 1.1: Porcentagem de limite de resistência à tração remanescente em condutor de alumínio 1350-H19, quando submetido a diferentes temperaturas de emergência. Fonte: The Aluminium Association (1989).....	5
Figura 1.2: Parte do mapa Geoelétrico do Distrito Federal. Fonte: Fornecida pela Companhia Elétrica de Brasília.....	66
Figura 2.1: Corpo de prova típico utilizado em ensaios de tração. Fonte: ANBT NBR 7549:2008.....	9
Figura 2.2: Diagrama tensão-deformação obtido de um ensaio de tração padronizado para materiais dúcteis. Fonte: Shigley (2005)	10
Figura 2.3: Corpo de prova com empescoçamento. Fonte: Shigley (2005)	11
Figura 2.4: Diagrama tensão-deformação verdadeiro. Fonte: Shigley (2005)	11
Figura 2.5: Condutor do tipo ACSR. Fonte: Catálogo da Deangeli Prodotti (2014)	13
Figura 2.6: Comportamento típico de uma liga envelhecida artificialmente. Fonte: Callister (2000)	15
Figura 2.7: Representação esquemática de vários estágios do processo de formação do precipitado. (a) Solução sólida supersaturada. (b) Formação de uma fase metaestável de transição. (c) Precipitado em equilíbrio dentro de uma matriz. Fonte: Callister (2000).....	15
Figura 2.8: Estágio do endurecimento por precipitação da liga Al-Mg-Si. (a) Precipitados coerentes. (b) Precipitados semi coerentes. (c) Precipitados incoerentes formados devido ao excesso de envelhecimento.....	16
Figura 2.9: Diagrama de fases ternário da liga Al-Mg-Si no estado líquido.....	17
Figura 2.10: Diagrama de fases ternário da liga Al-Mg-Si no estado sólido.....	18
Figura 2.11: Fluxograma simplificado da fabricação de cabos de alumínio liga 6201.....	19
Figura 3.1: Fornos Mufla do Laboratório de Engenharia Mecânica.....	21
Figura 3.2: Perfil dos arames que compõe uma seção do cabo 900MCM, após desfeito o encordoamento.....	22
Figura 3.3: Corpo de prova marcado para as tomadas de diâmetro.....	23
Figura 3.4: Máquina de ensaio universal MTS durante a realização de um ensaio de tração.....	24
Figura 3.5: Medidor de pressão nos mordentes da máquina de ensaios universal MTS.....	25
Figura 3.6: Arame de uma das camadas do cabo imediatamente após a ruptura.	25
Figura 3.7: Print scream da tela do computador, mostrando o software Satation Manager logo após a ruptura de uma amostra.....	26

Figura 3.8: Corpos de prova catalogados, prontos para testes cristalográficos.....	26
Figura 3.9: Microscópio Confocal do Laboratório do Departamento de Engenharia Mecânica da UnB.....	27
Figura 3.10: Microscópio Eletrônico de Varredura do Departamento de Engenharia Mecânica.....	28
Figura 3.11: Microscópio Óptico do Departamento de Engenharia Mecânica.....	29
Figura 4.1: Valores médios de resistência à tração do condutor 900MCM em MPa.....	32
Figura 4.2: Valores médios de resistência à tração do condutor 1055 em MPa.....	32
Figura 4.3: (a) Imagem tridimensional gerada após utilização de uma escala de cores.....	33
Figura 4.4: Detalhe das falhas do CAL 900MCM. (a) Sem tratamento térmico. (b) Com tratamento de 100h. (c) Com tratamento de 250h. d) Com tratamento de 500h.....	34
Figura 4.5: Detalhe das falhas do CAL 1055. (a) Sem tratamento térmico. (b) Com tratamento de 100h. (c) Com tratamento de 250h. d) Com tratamento de 500h.....	35
Figura 4.6: 900MCM ampliado 30 vezes (esquerda). Ampliação de 1200 nas indicações (direita).....	37
Figura 4.7: Ampliação de 1200 vezes da região central da falha. (a) Sem tratamento. (b) Com tratamento de 100h. (c) Com tratamento de 250h. (d) Com tratamento de 500h.....	38
Figura 4.8: Ampliação de 1200 vezes da região central da falha. (a) Sem tratamento. (b) Com tratamento de 100h. (c) Com tratamento de 250h. (d) Com tratamento de 500h.....	39
Figura 4.9: Imagem original (primeira imagem da esquerda para a direita de cima para baixo), seguida das imagens geradas após o ImageJ transformar a original em uma imagem de escala preto e branco.....	40
Figura 4.10: Imagens originais do CAL 900MCM (a esquerda) e modificadas pelo ImageJ (a direita).....	41
Figura 4.11: Imagens originais do CAL 900MCM (a esquerda) e modificadas pelo ImageJ (a direita).....	42
Figura 4.12: Imagens obtidas através de ampliação de 500 vezes do cabo 900MCM em um Microscópio Óptico. (a) Ampliação do fio central. (b) Ampliação da coroa 1. (c) Ampliação da coroa 2. (d) Ampliação da coroa 3.....	44
Figura 4.13: Imagens obtidas através de ampliação de 500 vezes do cabo 1055 em um Microscópio Óptico. (a) Ampliação do fio central. (b) Ampliação da coroa 1. (c) Ampliação da coroa 2. (d) Ampliação da coroa 3. (e) Ampliação da coroa 4.....	45
Figura 4.14: Comparação das fases antes e após cada tratamento térmico.....	46

Figura 4.15: Imagens obtidas através de ampliação de 1000 vezes do cabo 900MCM (esquerda) e 1055 (direita), em um Microscópio Óptico. (a) 900MCM sem tratamento. (b) 1055 sem tratamento. (c) 900MCM com tratamento de 500h. (d) 1055 com tratamento de 500h.....47

Figura 4.16: Pontos marcados em uma amostra de CAL 900MCM fio central como recebido, ampliação de 2000 vezes. (a) Pontos marcados de 1 a 3. (b) Pontos marcados de 7 a 12.....48

Figura 4.17: Sequência de formação teórica das fases de uma liga Al-Mg-Si. Fonte: Banhart (2010).....50

Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Quantidades máximas em porcentagem de massa de elementos químicos presentes na liga 6201 quando utilizada na fabricação de condutores elétricos.....	16
Tabela 3.1: Propriedades do cabo 900MCM. Fonte: Catálogo Nexans (2009).....	20
Tabela 3.2: Propriedades do cabo 900MCM. Fonte:Nexans (2009).....	20
Tabela 4.1: Valores médios obtidos para as resistências à tração de cada fio	31
Tabela 4.2: Redução da média dos limites de resistência à tração.....	33
Tabela 4.3: Valores médios dos diâmetros apresentados pelas estrições.....	35
Tabela 4.4: Redução percentual das estrições	36
Tabela 4.5: Parâmetros medidos a partir do ImageJ.....	43
Tabela 4.6: Valores em porcentagem de massa de alumínio (Al), magnésio (Mg) e silício (Si) presente nos pontos analisados.....	49
Tabela A: Cronograma de atividades dos fornos durante os tratamentos térmicos.....	54
Tabela B.1: Diâmetro dos arames do CAL 900 Como Recebido.....	56
Tabela B.2: Diâmetro dos arames do CAL 900 com Tratamento de 100h.....	57
Tabela B.3: Diâmetro dos arames do CAL 900 com Tratamento de 250h.....	58
Tabela B.4: Diâmetro dos arames do CAL 900 com Tratamento de 500h.....	59
Tabela B.5: Diâmetro dos arames do CAL 1055 como recebido.....	60
Tabela B.6: Diâmetro dos arames do CAL 1055 com tratamento de 100h.....	61
Tabela B.7: Diâmetro dos arames do CAL 1055 com tratamento de 250h.....	62
Tabela B.8: Diâmetro dos arames do CAL 1055 com Tratamento de 500h.....	64
Tabela B.9.1: Cargas máximas suportadas pelos corpos de prova do CAL 900MCM como recebido.....	66
Tabela B.9.2: Cargas máximas suportadas pelos corpos de prova do CAL 900MCM com 100h de Tratamento.....	66
Tabela B.9.3: Cargas máximas suportadas pelos corpos de prova do CAL 900MCM com 250h de tratamento.....	66
Tabela B.9.4: Cargas máximas suportadas pelos corpos de prova do CAL 900MCM com 500h de tratamento.....	67

Tabela B.10.1: Cargas máximas suportadas pelos corpos de prova do CAL 1055 como recebido.....	67
Tabela B.10.2: Cargas máximas suportadas pelos corpos de prova do CAL 1055 com 100h de tratamento.....	68
Tabela B.10.3: Cargas máximas suportadas pelos corpos de prova do CAL 1055 com 250h de tratamento.....	68
Tabela B.10.4: Cargas máximas suportadas pelos corpos de prova do CAL 1055 com 500h de tratamento.....	69
Tabela B.11.1: Distância vertical entre o pico e o vale das falhas do CAL 900MCM como recebido.....	69
Tabela B.11.2: Distância vertical entre o pico e o vale das falhas do CAL 900MCM com 100h de tratamento.....	69
Tabela B.11.3: Distância vertical entre o pico e o vale das falhas do CAL 900MCM com 250h de tratamento.....	70
Tabela B.11.4: Distância vertical entre o pico e o vale das falhas do CAL 900MCM com 500h de tratamento.....	70
Tabela B.12.1: Distância vertical entre o pico e o vale das falhas do CAL 1055 como recebido.....	70
Tabela B.12.2: Distância vertical entre o pico e o vale das falhas do CAL 1055 com 100h de tratamento.....	71
Tabela B.12.3: Distância vertical entre o pico e o vale das falhas do CAL 1055 com 250h de tratamento.....	71
Tabela B.12.4: Distância vertical entre o pico e o vale das falhas do CAL 1055 com 500h de tratamento.....	71
Tabela B.13.1: Diâmetro das estricções do CAL 900MCM como recebido.....	72
Tabela B.13.2: Diâmetro das estricções do CAL 900MCM com 100h de tratamento.....	72
Tabela B.13.3: Diâmetro das estricções do CAL 900MCM com 250h de tratamento.....	72
Tabela B.13.4: Diâmetro das estricções do CAL 900MCM com 500h de tratamento.....	73
Tabela B.14.1: Diâmetro das estricções do CAL 1055 como recebido.....	73
Tabela B.14.2: Diâmetro das estricções do CAL 1055 com 100h de tratamento.....	73
Tabela B.14.3: Diâmetro das estricções do CAL 1055 com 250h de tratamento.....	74
Tabela B.14.4: Diâmetro das estricções do CAL 1055 com 500h de tratamento.....	74
Tabela B.15.1: Erro das medições de carga máxima do 900MCM sem tratamento.....	74

Tabela B.15.2: Erro das medições de carga máxima do 900MCM com 100h de tratamento.....	75
Tabela B.15.3: Erro das medições de carga máxima do 900MCM com 250h de tratamento.....	75
Tabela B.15.4: Erro das medições de carga máxima do 900MCM com 500h de tratamento.....	75
Tabela B.16.1: Erros associados as medições de carga máxima do CAL 1055 como recebido.....	75
Tabela B.16.2: Erros associados as medições de carga máxima do CAL 1055 com 100h de tratamento.....	76
Tabela B.16.3: Erros associados as medições de carga máxima do CAL 1055 com 250h de tratamento.....	76
Tabela B.16.4: Erros associados as medições de carga máxima do CAL 1055 com 500h de tratamento.....	76
Tabela B.17.1: Erro da medição da distância vertical entre o pico e o vale das falhas do CAL 900MCM como recebido.....	77
Tabela B.17.2: Erro da medição da distância vertical entre o pico e o vale das falhas do CAL 900MCM com 100h de tratamento.....	77
Tabela B.17.3: Erro da medição da distância vertical entre o pico e o vale das falhas do CAL 900MCM com 250h de tratamento.....	77
Tabela B.17.4: Erro da medição da distância vertical entre o pico e o vale das falhas do CAL 900MCM com 500h de tratamento.....	78
Tabela B.18.1: Erros associados as medições de topografia do CAL 1055 sem tratamento.....	78
Tabela B.18.2: Erros associados as medições de topografia do CAL 1055 com 100h de tratamento.....	78
Tabela B.18.3: Erros associados as medições de topografia do CAL 1055 com 250h de tratamento.....	78
Tabela B.18.4: Erros associados as medições de topografia do CAL 1055 com 500h de tratamento.....	79
Tabela B.19: Erros associados as médias de resistência à tração dos condutores	79

Lista de Símbolos

SÍMBOLOS LATINOS

P	Carga Axial
A_0	Área Inicial da Seção circular do Corpo de Prova
d_0	Diâmetro Inicial do Corpo de Prova
l	Comprimento Correspondente a Carga P
l_0	Comprimento Útil do Corpo de Prova
Δl	Variação do Comprimento
S_y	Limite a Tensão de Escoamento
S_u	Limite de Resistência à Tração
pl	Limite de Proporcionalidade
el	Limite Elástico
f	Tensão de Ruptura
E	Módulo de Elasticidade
\bar{x}	Média Aritmética da Grandeza x
N	Número de Elementos da Amostra
x_i	Elemento da Amostra de Posição i
S_x	Desvio-padrão

SÍMBOLOS GREGOS

σ	Tensão
ε	Deformação

Capítulo 1 INTRODUÇÃO

1.1 HISTÓRICO

Segundo Labegalini (1992), as primeiras aplicações de caráter econômico de energia elétrica datam de 1870, momento no qual dínamos e motores de corrente contínua atingiram um estágio que permitiam suas utilizações em ambiente industrial. Data-se dessa mesma época o início da substituição da iluminação pública a gás pelas lâmpadas de arco voltaico. A primeira empresa com foco na geração e venda de energia elétrica surgiu em 1882 em Nova York, cujo projeto foi de autoria de Thomas Edson. Utilizando máquinas a vapor como forma de acionamento, essa usina possuía uma rede de distribuição subterrânea que abrangia cerca de 1,6km de raio de suas mediações. Tal transmissão ocorria em corrente contínua com tensão de 110V destinada principalmente a iluminação pública e de residências. A produção e condução em baixas potências e tensões, bem como a inexistência da tecnologia dos transformadores, impediam que a distribuição fosse realizada a maiores distâncias sem perdas consideráveis de eficiência. A aceitação da nova tecnologia foi bastante rápida e a produção necessitou ser ampliada, algo que só era possível com a construção de novas centrais em virtude de limitações impostas ao transporte de energia elétrica a longas distâncias.

A utilização econômica da corrente alternada começou na França com a invenção dos transformadores elétricos, algo que permitiu a elevação das tensões nas linhas de transmissão, possibilitando o transporte de energia mais econômico a potências elevadas e a longas distâncias. Em 1886 já havia uma rede de corrente alternada em funcionamento nos Estados Unidos com destinação a iluminação pública, Labegalini (1992).

Com o rápido avanço das inovações relacionadas à produção e distribuição de energia elétrica, a disseminação desse tipo de tecnologia se deu de tal forma que antes mesmo do final do século XIX surgiram linhas de transmissão com mais de 20km de extensão e operando em tensões da ordem de quilovolts. Na primeira década do século XX linhas de transmissão já operavam sob alta tensão em alguns países, Labegalini (1992).

1.2 CONTEXTO DO DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

Segundo Aggarwal (2002), o transporte de energia elétrica via linhas de transmissão aéreas é a forma mais frequentemente utilizada, bem como a que apresenta o melhor custo benefício, para esse tipo de aplicação. Como essa forma de transmissão geralmente utiliza cabos nus (sem isolamento), e expostos ao ar livre, diversos fatores aceleram a deterioração de seus componentes, como exposição a ventos, intemperes e contato direto com detritos e umidade, algo que com o tempo pode gerar defeitos sérios tal como o colapso do cabo.

O sistema de transmissão de energia elétrica via cabos demanda um enorme investimento de capital, além de ser de primeira importância econômica e social em qualquer país. Portanto, são necessárias formas eficazes de garantir que falhas prematuras de qualquer componente desses sistemas não ocorram, acarretando assim perdas financeiras significativas e um transtorno enorme para todos que dependam dele.

Muitas linhas de alta tensão possuem mais de 30 anos de atividade, e devido à crescente demanda de energia, muitas delas são obrigadas a operar muito próximas aos seus limites. Existem, inclusive, linhas que estão operando acima das suas faixas térmicas de projeto (temperatura de operação por volta dos 90°C). Essa realidade influi negativamente na duração dos cabos dessas redes, que perdem resistência mecânica de maneira proporcional à temperatura que são submetidos durante o trabalho, Densley (2001).

O rompimento de cabos em linhas de transmissão pode acarretar em prejuízos da ordem de milhões de reais, como foi o caso da série de apagões que ocorreu em 2001, após fadiga mecânica provocada por vibrações eólicas, boletim da ONS (2009). Esse acidente provocou o desligamento de 13 das 18 turbinas da usina de Itaipu, responsável pelo fornecimento de cerca de 30% da energia do Brasil, resultando em prejuízo de mais de 100 milhões de reais. Outros blecautes ocasionados por falhas mecânicas nas linhas estão fortemente marcados na história do país, uma vez que atingem parcelas enormes da população e causam transtornos sem precedentes. Em 2002, a queda de uma linha sobre o Rio Paraná deixou cerca de 67 milhões de habitantes sem energia, Azevedo (2002). Em 2009, rompimento nos cabos de transmissão entre Furnas e a subestação Goiânia Leste provocou cerca de 90% de blackout no estado de Goiás, CELG (2009).

O crescimento do Brasil, e de qualquer outro país, está intrinsicamente relacionado ao constante aumento do fornecimento de energia elétrica, IMPEA (2005). Segundo o mesmo órgão, o consumo de energia cresceu aproximadamente 30% a mais que a economia entre 1980 e 2003. Conforme um estudo da EPE (Empresa de Pesquisa Energética), de maio de 2008, o Brasil teria um aumento de consumo de energia de 5,5% ao ano entre 2007 e 2017. Tais projeções demonstram o peso e a importância estratégica que o sistema de produção e distribuição de energia exerce em um país, exigindo um nível de confiabilidade elevado que garanta seu crescimento e passe credibilidade para investidores estrangeiros.

A Lei nº. 9.991, de 24 de julho de 2000, estabelece que as empresas do setor elétrico devem investir parte da receita operacional em pesquisa, desenvolvimento e em eficiência energética, o que retrata a preocupação com o futuro cenário energético brasileiro. Com base nesse tipo de regulamentação que laboratórios para ensaios de cabos, como o existente no Departamento de Engenharia Mecânica da UnB, recebem investimentos e incentivo para desenvolver pesquisa nessa área.

1.3 OBJETIVOS

Este trabalho visa quantificar o decréscimo do limite de resistência à tração dos arames de cabos condutores de alumínio liga 6201 que, após serem submetidos a um ciclo único de tratamento térmico, simulam condutores que sofreram ciclos de sobrecarga elétrica ao longo da vida. Também faz parte dos objetivos, identificar o mecanismo que atua na diminuição do limite de resistência à tração dessa liga e identificar seu modo de falha sob as condições ensaiadas (ensaio de tração).

1.4 METODOLOGIA

A primeira etapa desse trabalho consiste em estimar o decréscimo do limite de resistência à tração dos cabos de alumínio liga 6201, após passarem por picos de temperatura durante as sobrecargas elétricas que ocorrem ao longo de sua vida. Para realizar essa estimativa, dois modelos de cabos dessa mesma liga foram selecionados como objeto de estudo (CAL 900MCM e CAL 1055, fabricante Nexans). Tais modelos foram escolhidos por se tratarem de modelos padrões (37 e 61 arames, respectivamente), frequentemente utilizados em linhas de alta tensão, além de serem modelos disponíveis para ensaio na UnB. Os dois cabos foram desbobinados e quatro amostras com aproximadamente 1000mm cada foram seccionadas de cada modelo. Utilizando uma amostra de cada modelo como recebido (sem passar por nenhum tratamento térmico), foi realizado o desencordoamento dos arames que compõe o cabo. Para cada coroa de fios que formam o condutor, sete corpos de prova de 140mm cada foram produzidos. Os corpos de prova foram ensaiados sob tração até a ruptura em uma máquina hidráulica uniaxial da fabricante MTS. Para cada coroa, pretendia-se obter cinco ensaios válidos, esse valor foi estabelecido devido a restrições de tempo e de quantidade de amostras. A partir desses primeiros experimentos de ruptura, os valores médios do limite de resistência à tração de cada coroa de arames dos cabos em análise foram estabelecidos.

A utilização dos arames dos cabos para realizar os ensaios e as análises em detrimento da utilização do cabo como um todo, ocorreu devido a quantidade limitada de amostras e ao fato do laboratório da Engenharia Mecânica da UnB não possuir uma máquina de ensaios de tração específica para cabos. Porém, de acordo com a *ASTM Standards (1985)*, a resistência teórica à tração de um cabo pode ser estimada através da resistência dos arames. O valor do limite teórico de resistência de um condutor é determinado pela soma das resistências de seus arames e, segundo a mesma referência, a resistência mínima a tração de um condutor de alumínio liga 6201 é dada pela multiplicação da resistência teórica à tração por um fator que varia de acordo com as características do condutor. Para os condutores 900MCM e 1055, esses fatores são 0.91 e 0.9, respectivamente.

Após o ensaio de rupturas dos arames como recebidos, as demais amostras de cabos foram submetidas a tratamentos térmicos de patamares únicos a 140°C, em um forno mufla da fabricante Linn High Therm, com o intuito de realizar um ensaio acumulado de aquecimento. A temperatura de 140°C foi escolhida por ser indicada na ABNT NBR 14039:2005 como a temperatura máxima na qual os

isolantes de um condutor devem trabalhar em caso de sobrecargas elétricas, além desse fator, por volta da temperatura de 135° começa-se a observar a formação de precipitados, o que atua na fragilização acelerada da liga, como descrito por Karabay (2006). Tal ensaio visa simular as condições de sobrecarga (que geram aquecimento do condutor), ao longo da vida desses cabos. O ensaio de aquecimento acumulado foi utilizado, em detrimento de um ensaio de fadiga térmica, por uma questão de praticidade, tendo em vista que segundo a *The Aluminium Association* (1985), o efeito térmico sofrido pelo condutor é acumulativo, ou seja, um condutor que passou por diversos ciclos de aquecimento ao longo de sua vida perderá aproximadamente o mesmo que um segundo passando por um único ciclo a mesma temperatura durante o tempo que corresponda à soma da duração de todos os ciclos do outro condutor. Portanto, cada par de amostras (uma de 900MCM e outra de 1055), passou por tratamentos únicos, com durações diferentes (100h, 250h e 500h). Os tempos de 100h e 500h são indicados na norma ABNT NBR 14039:2005 como tempos de máxima duração em que um condutor pode ficar submetido a sobrecarga, durante o período de 1 ano de serviço e durante a vida do condutor, respectivamente. O tratamento com duração de 250h foi realizado para se observar o comportamento da liga entre a faixa de 100h e 500h.

O mesmo procedimento de ensaio de tração, descrito para as amostras dos cabos como recebidos, foi utilizado para ensaiar os cabos que passaram por tratamentos térmicos. Com os novos valores de limite de resistência à tração, foi possível quantificar a redução desse parâmetro, que a liga apresentou após os tratamentos.

A segunda etapa desse trabalho procura entender quais mecanismos atuam no material, favorecendo a diminuição do limite de resistência à tração dos cabos que passaram pelo ciclo térmico, que simula condições de sobrecargas elétricas. Para tal, primeiramente um Microscópio Confocal da marca LEXT foi utilizado na medição da estricção nas falhas dos corpos de provas, e a partir da comparação desses valores observar possíveis variações de ductilidade da peça. A fim de determinar o modo de falha do material, as regiões de ruptura dos corpos de prova foram analisadas em um Microscópio Eletrônico de Varredura (marca JEOL), em ampliação de 1200 vezes, que possibilitou a visualização das microcavidades formadas durante a ruptura.

Para observação das fases que compõe a liga 6201 e seu comportamento após os tratamentos térmicos, ensaios metalográficos foram realizados em todas as oito amostras de cabo. Um microscópio óptico Olympus foi utilizado e imagens com ampliação de 500 e 1000 vezes foram geradas, possibilitando a comparação entre as fases dos cabos como recebidos e dos cabos tratados. Com o intuito de observar a composição química de cada fase e as consequentes alterações ocasionadas pelos tratamentos, o Microscópio Eletrônico de Varredura foi novamente utilizado para uma caracterização química das fases pelo método de espectroscopia de energia dispersiva.

1.5 JUSTIFICATIVA PARA A REALIZAÇÃO DO ESTUDO

Como é apontado pela *The Aluminium Association* (1989), as temperaturas de trabalho sob condições de emergência (condição em que a linha trabalha acima da carga nominal em decorrência de maior solicitação da rede por parte dos consumidores), são na prática, as realmente consideradas na hora de se fazer uma previsão da perda de resistência mecânica dos cabos de transmissão devido a efeitos térmicos. Temperaturas de sobrecarga (até 140°C) e curto-circuito (até 250°C), apesar de mais elevadas, são desprezadas. Essa simplificação é feita por não se considerar que tais regimes apresentam um tempo significativo de ocorrência ao longo da vida útil do cabo, quando comparadas com os tempos totais em regime de emergência. Nesse trabalho, pretende-se analisar se, desconsiderados os efeitos das sobrecargas, não estão sendo gerados erros relevantes no cálculo de declínio de resistência de tais condutores.

As perdas de resistência geradas por regimes de emergência ao longo da vida útil de um cabo de transmissão em alta tensão são elevadas, como é apresentado na Figura 1.1. Tal perda gera toda uma preocupação em se controlar o tempo de ocorrência desse tipo de evento, que possui potencial danoso ainda menor do que sobrecargas ou curtos-circuitos, que implicam em temperaturas de operação ainda maiores, *The Aluminium Association* (1989).

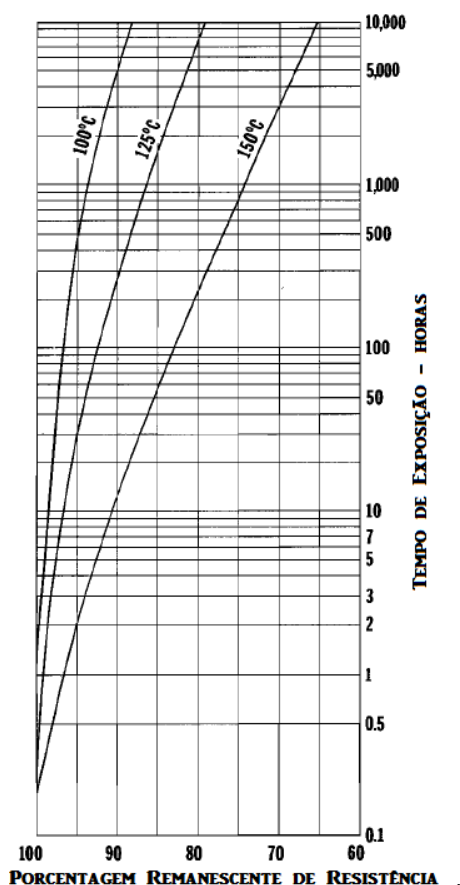


Figura 1.2: Porcentagem de limite de resistência à tração remanescente em condutor de alumínio 1350-H19, quando submetido a diferentes temperaturas de emergência. Fonte: *The Aluminium Association* (1989).

A Figura 1.2 ilustra uma parte do mapa Geométrico de Brasília, fornecido pela empresa CEB (Companhia Elétrica de Brasília), para o presente estudo. Desde outubro de 2015, a linha de transmissão subterrânea que interliga as subestações 03 e 06 passou a contar com sensores de monitoramento térmico, sendo a primeira linha do Distrito Federal a possuir tal tipo de acompanhamento, segundo a CEB. O monitoramento tem como objetivo fornecer dados para um estudo que já está sendo elaborado pela companhia, que pretende analisar a frequência de ocorrência de ciclos de sobreaquecimento que tais linhas estão submetidas.

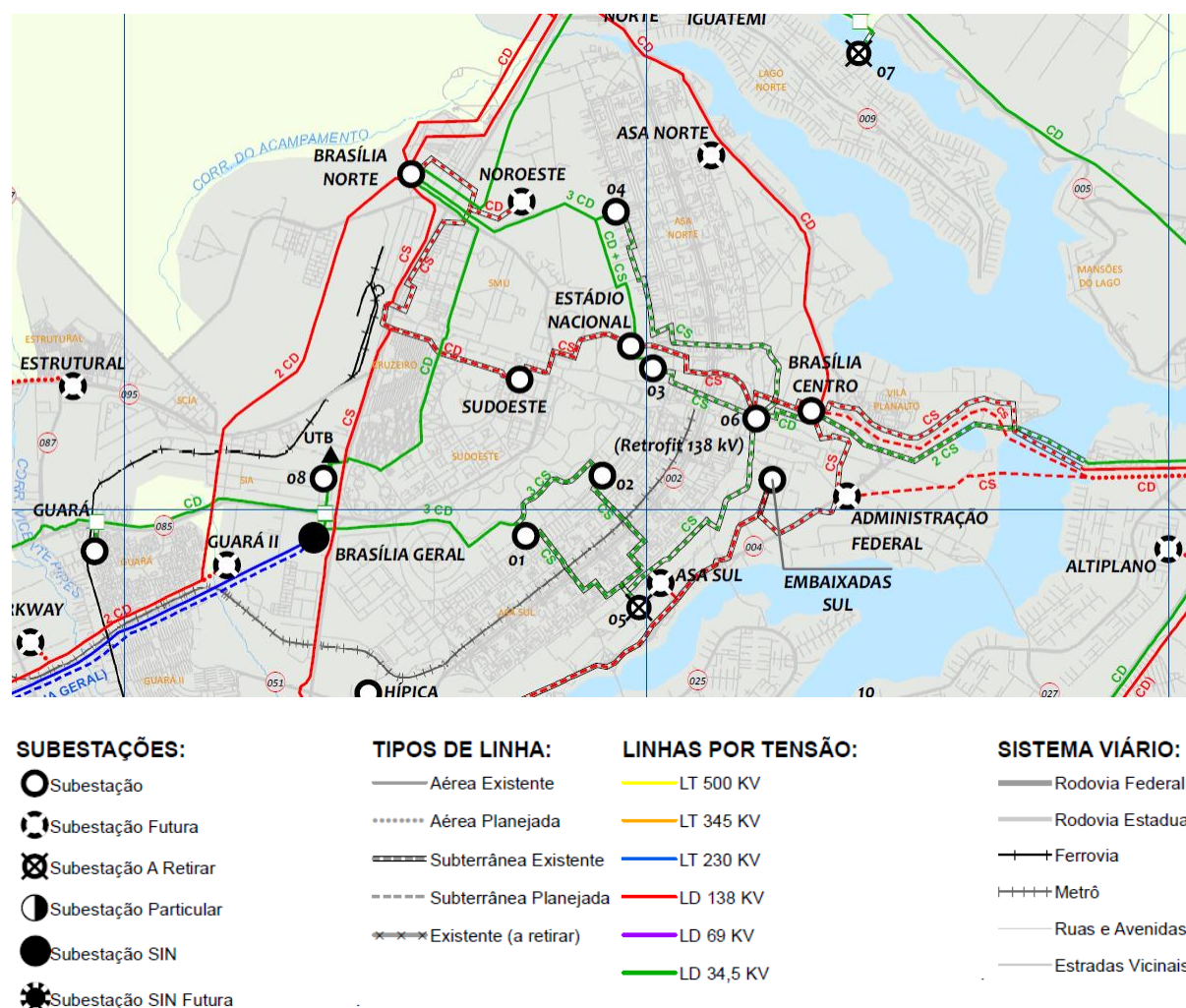


Figura 1.3: Parte do mapa Geométrico do Distrito Federal. Fonte: Fornecida pela Companhia Elétrica de Brasília. Fonte: Companhia Elétrica de Brasília.

A CEB, que foi fundada em 1968, apenas recentemente (há cerca de 1 ano), iniciou o estudo mencionado, o que ilustra a dificuldade de se obter dados relacionados à temperatura real na qual as linhas de transmissão estão submetidas no Brasil. A preocupação da empresa com problemas de origem térmica, além do investimento de recursos para a realização do estudo e monitoramento, indica a suspeita de que o sobreaquecimento esteja danificando componentes das linhas de transmissão. Tais suspeitas, bem como a falta de informações na literatura sobre a deterioração do cabo em função do tempo em que

ele foi submetido a condições de sobrecarga, são as principais motivações que impulsionaram esse estudo.

A temperatura atingida durante regime de sobrecarga foi definida como sendo a temperatura foco desse trabalho, em detrimento da temperatura atingida em curto-circuito. A escolha dessa faixa de temperatura ocorreu em função do maior tempo de duração com que uma linha de transmissão fica submetida a sobrecarga, em comparação com o curto-circuito. A ABNT NBR14039:2005 define ainda que para eventos de sobrecarga, o dispositivo de proteção pode ser acionado com um pequeno retardo de tempo, o que faz com que o sistema possa ficar submetido a alguns instantes a sobrecarga. Enquanto que o curto circuito deve ser identificado e corrigido instantaneamente, de acordo com a norma.

Capítulo 2 EMBASAMENTO TEÓRICO

2.1 INTRODUÇÃO

Esse capítulo, além de definir alguns termos que serão usuais ao longo do trabalho, também apresenta o método padrão aplicado ao se realizar ensaios de tração e uma breve explanação acerca das ferramentas estatísticas empregadas nesse estudo. Ao final, expõe uma abordagem geral sobre processos de fabricação dos cabos de liga 6201-T81.

2.2 DEFINIÇÕES

Algumas definições sobre operação de linhas de transmissão serão apresentadas.

Operação Nominal

Operação na qual o valor de corrente não ultrapassa o valor estabelecido em projeto. Esse funcionamento praticamente não gera perdas de resistência do material ao longo de sua vida útil. (ABNT NBR 5422:1985)

Operação em Emergência

É considerada operação de emergência a situação em que a linha transporta corrente acima do valor nominal de projeto, durante períodos de tempo considerados curtos com relação ao período anual de operação. As operações de emergência não devem ultrapassar a duração de 4 dias. O somatório das horas de operação em regime de emergência não deve exceder 5% do total de horas em regime normal. (ABNT NBR NM280).

Operação em Sobrecarga

Trata-se do funcionamento ou operação de um dispositivo ou circuito elétrico, com carga superior a carga de projeto. Sobrecarga é parte da carga existente que excede a carga plena. Ocorre quando existe uma solicitação de energia maior do que a suportada pelo projeto da rede, causando acionamento imediato ou quase imediato do dispositivo de segurança. (ABNT NBR14039:2005).

Operação em Curto-Circuito

É definido como o funcionamento em vazio com corrente de saída nula. O funcionamento em vazio ocorre quando o dispositivo elétrico não está transmitindo potência para o circuito exterior. (ABNT NBR 5456:2010).

Curto-circuito é a ligação entre dois ou mais pontos de um circuito através de uma resistência desprezível, gerando correntes altíssimas, muito acima do valor estabelecido em projeto. O acionamento do dispositivo de segurança deve se dar de maneira imediata. (ABNT NBR14039:2005).

Alta Tensão

Tensão que se encontra na faixa de 36 a 150kV, manual da Prysmian (2014).

2.3 ENSAIO DE TRAÇÃO

Como é apresentado por Shigley (2005) e Callister (2000), o comportamento mecânico de vários materiais pode ser avaliado através de um ensaio tensão-deformação. Tais ensaios são mais comumente feitos em metais à temperatura ambiente. Os ensaios mais comuns desse gênero são realizados em um corpo de prova submetido à tração.

O ensaio de tração ocorre com uma amostra sendo submetida a carga de tração acrescida gradativamente de maneira uniaxial e longitudinal. Geralmente esse ensaio é conduzido até que o material frature ou deforme de maneira irreversível. A Figura 2.1 apresenta um espécime padronizado utilizado em um ensaio de tração.

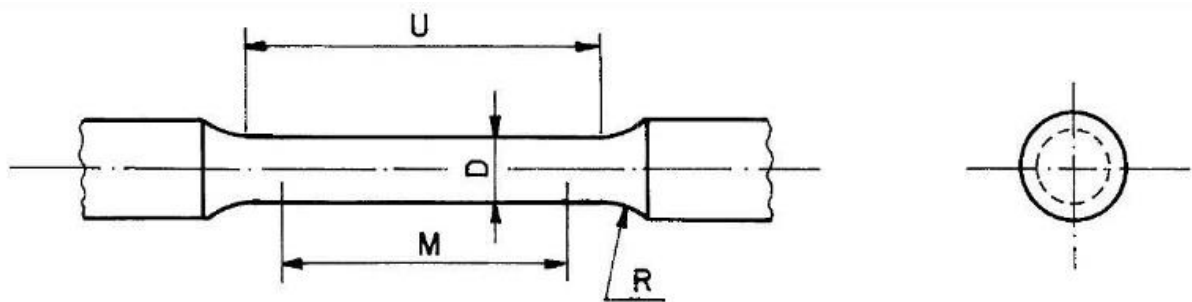


Figura 2.1: Corpo de prova típico utilizado em ensaios de tração. Fonte: ANBT NBR 7549:2008.

Na Figura 2.1, o diâmetro inicial d_0 e o comprimento de bitola l_0 são utilizados para medir as tensões e deformações que ocorrem ao longo do ensaio, tais valores são medidos e registrados antes do ensaio começar. Usualmente amostras que apresentam seções retas circulares são utilizadas nestes ensaios, mas também é possível que outras geometrias de bitola sejam utilizadas.

A ANBT NBR 7549:2008, define que o diâmetro padrão do corpo de prova deva ser de 12,50 mm, exceto quando as dimensões do objeto em análise o tornam impossível. No caso dos testes realizados nesse estudo, o diâmetro utilizado necessitou ser menor do que o indicado na norma.

Para iniciar o teste, o espécime é fixado na máquina, quando então se inicia um vagaroso carregamento de tração. A máquina de ensaio de tração é projetada para alongar o corpo de prova a uma taxa constante, tomando simultaneamente as medidas da carga P aplicada e dos alongamentos apresentados. A carga P é utilizada para calcular a tensão σ através da seguinte relação:

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \quad , \quad (2.1)$$

sendo que A_0 é a área original da seção reta de um espécime.

A deformação é calculada por:

$$\varepsilon = \frac{l-l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0}, \quad (2.2)$$

em que l é o comprimento apresentado correspondente à carga P .

As relações de tensão e deformação apresentadas, também conhecidas como tensão e deformação de engenharia, são parâmetros necessários para normalizar a carga e o alongamento medidos, minimizando os fatores geométricos apresentados no ensaio. Esses fatores geométricos ocorrem pelo fato de que as características carga-deformação são dependentes do tamanho da amostra, variando então para diferentes corpos de prova de um mesmo material.

Após a conclusão do ensaio um gráfico similar ao apresentado na Figura 2.2 é obtido.

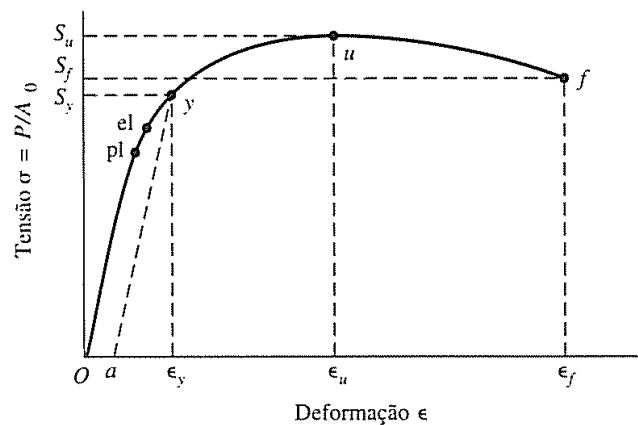


Figura 2.2: Diagrama tensão-deformação obtido de um ensaio de tração padronizado para materiais dúcteis. Fonte: Shigley (2005).

Os principais elementos representados na curva são:

- *pl* – Limite de Proporcionalidade, ponto no qual a curva começa a se desviar de uma reta;
- *el* – Limite Elástico;
- S_y – Limite de Escoamento;
- S_u – Resistência à Tração;
- *f* – Tensão de Ruptura.

Seguindo o gráfico de sua origem até o ponto *f*, é possível observar o comportamento de determinado material quando ele é submetido a tração. Entre a origem e o ponto *pl* temos uma reta, que representa uma relação linear entre tensão e deformação. Até o ponto *el* se tem a faixa que caracteriza o regime elástico do material. Nesse intervalo a relação tensão-deformação é fornecida pela lei de Hooke

$$\sigma = E\varepsilon, \quad (2.3)$$

em que E é denominado *módulo de Young* ou *módulo de elasticidade*. Além do ponto pl a curva começa a se afastar de uma reta.

Se o espécime for carregado acima do ponto el , o material apresentará deformações no regime plástico no qual qualquer deformação se torna permanente. No ponto u , o corpo de prova atinge a máxima tensão suportada, caracterizando a Resistência à Tração do material.

O diagrama apresentado na Figura 2.2 é conhecido como diagrama tensão-deformação de engenharia, uma vez que não apresentam valores reais de tensões e deformações. A equação 2.1 apresenta um valor de tensão calculada com base na área de seção transversal inicial da peça, antes dela ser submetida à tração. O que se observa, na realidade, é um efeito de “empescoçamento” no corpo de prova (Figura 2.3), o que diminui a área da seção transversal originando assim tensões ainda maiores que as calculadas (tensão verdadeira).



Figura 2.3: Corpo de prova com empescoçamento. Fonte: Shigley (2005).

Para se obter a tensão verdadeira, a carga e a seção transversal devem ser medidas simultaneamente durante o ensaio de tração. A principal característica a ser observada em um diagrama verdadeiro tensão-deformação é que a tensão verdadeira aumenta continuamente até a fratura da peça, o que difere bastante do comportamento apresentado no diagrama tensão-deformação de engenharia. A Figura 2.4 ilustra um diagrama tensão-deformação verdadeiro.

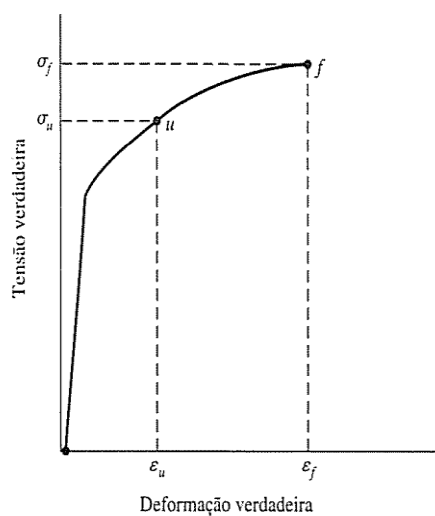


Figura 2.4: Diagrama tensão-deformação verdadeiro. Fonte: Shigley (2005).

A deformação de engenharia, calculada pela equação 2.2, considera a mudança líquida no comprimento, a partir do comprimento original. Para se obter a deformação verdadeira deve-se somar

as elongações incrementais e dividir pelo comprimento corrente da bitola do corpo de prova. A deformação verdadeira ϵ pode ser calculada por:

$$\epsilon = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0} . \quad (2.4)$$

2.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Como apresentado em Devore (2006), a utilização de modelos probabilísticos e do método estatístico para uma análise geral ou aprofundada de dados se tornou uma prática recorrente em áreas tecnológicas e científicas. Quaisquer resultado obtido através de experimentações em laboratório está sujeito a incertezas e variações. O erro intrínseco aos instrumentos de medição e às variantes que estão presentes nos objetos de análise, são os principais fatores que geram discordâncias nos resultados obtidos. A estatística fornece ferramentas para separar os efeitos sistemáticos dos aleatórios, presentes em todos os dados obtidos por medições. Através dessa separação, um padrão de variação começa a ficar evidente e a partir daí conclusões sobre o estudo podem ser tiradas.

2.4.1 Variáveis Aleatórias

De acordo com Shigley (2005), um ensaio de tração que objetiva, dentre outras coisas, descobrir a magnitude do limite de resistência à tração, é considerado um experimento aleatório, uma vez que os espécimes selecionados são escolhidos ao acaso. É esperado que os valores obtidos variem entre cada espécime individual submetidas ao ensaio. Essa discordância se deve principalmente pela impossibilidade de se fabricar corpos de prova com materiais perfeitamente homogêneos, ou exatamente do mesmo tamanho e resistência. A resistência obtida por esse tipo de experimento é chamada de variável aleatória, pois seu valor é determinado por um experimento aleatório.

2.4.2 Média Aritmética

A média aritmética é uma medida de tendência central dos valores medidos. A média de qualquer resultado x obtido de uma amostra com N elementos pode ser calculada pela equação:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_N}{N} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i . \quad (2.5)$$

2.4.3 Desvio-Padrão

O desvio-padrão é a medida mais comum da dispersão estatística. Ele representa o quanto há de variação das medidas coletadas em relação à média.

Para qualquer variável aleatória x , o desvio da i -ésima observação, em relação à média \bar{x} , é definido como $x_i - \bar{x}$. Para que a soma desses desvios não resulte em zero, eles são elevados ao quadrado. O desvio-padrão é definido como:

$$S_x = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} . \quad (2.6)$$

2.5 O USO DA LIGA 6201 NA FABRICAÇÃO DE CABOS CONDUTORES

Como apresentado por Karabay (2005), há mais de 80 anos o tipo de condutor mais utilizado em linhas de transmissão aéreas são do tipo ACSR, *Aluminium Conductor Steel Reinforced* (cabo de alumínio com alma de aço). Esse tipo de cabo une a altíssima condutividade do alumínio à excelente resistência mecânica do aço, que permite que a sustentabilidade de linhas compridas, algo que não seria possível caso fosse fabricada inteiramente em alumínio. A aplicação de condutores inteiramente de alumínio era possível apenas em linhas que possuíssem as torres de suporte muito próximas umas das outras, o que encarecia bastante o projeto. Distâncias excessivas entre as torres causavam o rompimento precoce dos cabos. A Figura 2.5 mostra um exemplo de ACSR, com núcleo de aço e 5 coroas de alumínio AA1350.



Figura 2.5: Condutor do tipo ACSR. Fonte: Catálogo da Deangeli Prodotti (2014).

O aço apresenta baixa condutividade, quando comparado ao alumínio, e por isso gera uma diminuição na quantidade de energia que poderia ser transmitida por uma seção transversal idêntica do cabo inteiramente em alumínio. Geralmente, para corrigir esse problema, mais camadas de alumínio são adicionadas às de aço, tornando os condutores demasiadamente pesados e espessos.

Karabay (2005) expõe que no século passado havia um grande interesse no desenvolvimento de alguma liga que pudesse ser utilizada para fabricar cabos que não necessitassem do aço. Durante esses esforços a liga 6201 foi desenvolvida e apareceu como uma grande solução para o problema dos ACSR. Há cerca de 30 anos os condutores fabricados inteiramente em alumínio liga começaram a se tornar bastante populares.

Segundo o Catálogo da Nexans (2014), a liga 6201 não conduz eletricidade tão bem quanto o alumínio 1350 (o cabo de alumínio 1350 possui 60% da condutividade do cobre puro enquanto a liga 6201 possui cerca de 52,5%), mas apresenta cerca do dobro da resistência mecânica, o que possibilita que ele resista aos esforços solicitados pela linha durante sua vida em operação. Jahn (1987) afirma ainda que um antigo problema de corrosão que os cabos ACSR apresentavam foi resolvido ao utilizar condutores feitos de material homogêneo. A liga 6201 pode, ainda, ter sua condutibilidade aumentada, em detrimento de sua resistência, e vice-versa, o que garante um elevado grau de versatilidade a essa liga.

Karabay (2014) afirma que a liga 6201, apesar de toda a euforia que causou com os primeiros anos de sua implementação, não foi capaz de resolver o problema por completo. As primeiras linhas que utilizaram o condutor de liga 6201 começaram a colapsar antes do final previsto para os cabos, causando enormes prejuízos e transtornos. Inicialmente, pouco se sabia sobre o motivo que acarretavam essas falhas. Porém, com contínua pesquisa na área, hoje se entende que o principal problema que acomete essas linhas é a fadiga por *fretting*, causada pela vibração oriunda das correntes de vento. Diversos estudos estão sendo continuamente realizados para caracterizar melhor esse tipo de falha, dentre eles, destaca-se o realizado no Laboratório de Fadiga e Integridade Estrutural de Cabos Condutores de Energia da UnB, destaque e referência no hemisfério sul, Eletronorte (2009).

2.6 ENVELHECIMENTO ARTIFICIAL

Callister (2000) apresenta o envelhecimento artificial como sendo uma das técnicas mais empregadas no endurecimento de ligas de alumínio de alta resistência, tal técnica favorece a precipitação dos elementos de liga, o que atua no aumento de resistência e dureza do material. O endurecimento por precipitação é obtido mediante dois tratamentos térmicos distintos. O primeiro consiste em um aumento de temperatura que objetiva a solubilização completa de um determinado elemento de liga em uma matriz metálica, formando uma solução monofásica. Logo após a completa solubilização desse elemento a liga é submetida a um rápido resfriamento de tal forma que as moléculas formadas pela inoculação do elemento de liga não possam se reagrupar. Ao final desse processo se tem uma solução sólida supersaturada, a qual proporciona pouca resistência à movimentação das discordâncias acarretando em uma liga com relativamente pouca resistência à tração e baixa dureza. O segundo tratamento térmico é de fato o envelhecimento artificial da liga, que consiste no reaquecimento da solução sólida supersaturada até uma temperatura intermediária (entre a ambiente e a temperatura utilizada para solubilizar os elementos de liga), durante um certo período de tempo que varia de liga para liga e com o objetivo final do tratamento.

O envelhecimento artificial atua fornecendo energia ao sistema a uma taxa controlada, possibilitando a difusão dos elementos de liga que aos poucos vão se aglomerando e formando novas fases, até finalmente formar precipitados que aumentam de tamanho de acordo com o tempo de envelhecimento.

A Figura 2.6 apresenta o comportamento de uma típica liga endurecível por precipitação. À medida que o envelhecimento é prolongado a resistência da peça aumenta, até chegar a um patamar máximo entre “a” e “b”, após esse patamar a liga passa por uma redução em sua resistência conhecida como superenvelhecimento, Callister(2000).

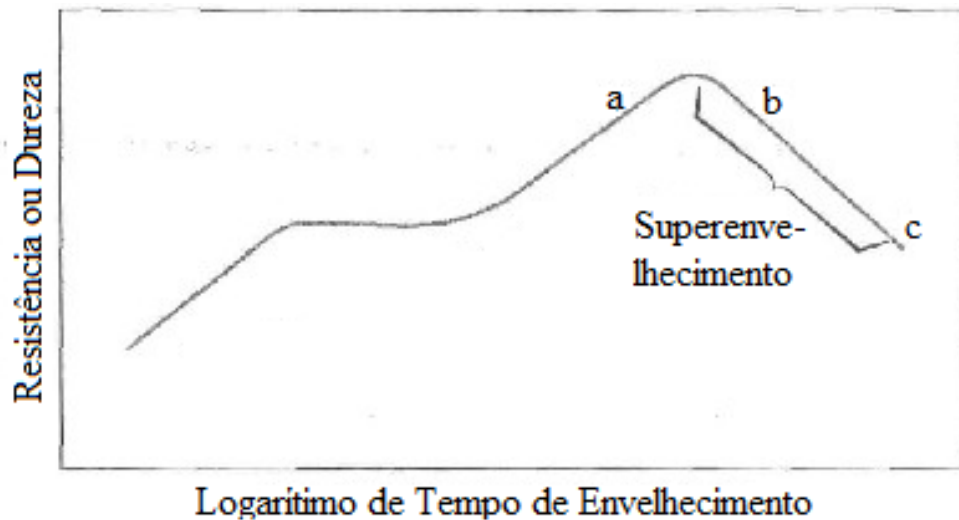


Figura 2.6: Comportamento típico de uma liga envelhecida artificialmente. Fonte: Callister (2000).

Durante um tratamento térmico por precipitação várias fases de transição são formadas em um primeiro estágio, a natureza das partículas e do formato dessas fases influenciam as propriedades mecânicas da liga. À medida que mais átomos do elemento de liga se ligam a uma fase ela cresce, até formar um precipitado. Tal fenômeno é ilustrado na Figura 2.7. O efeito do aumento de resistência e de endurecimento apresentados na Figura 2.6 resultam das partículas das inúmeras fases de transição metaestáveis (fases não estáveis), e dos precipitados, Callister (2000).

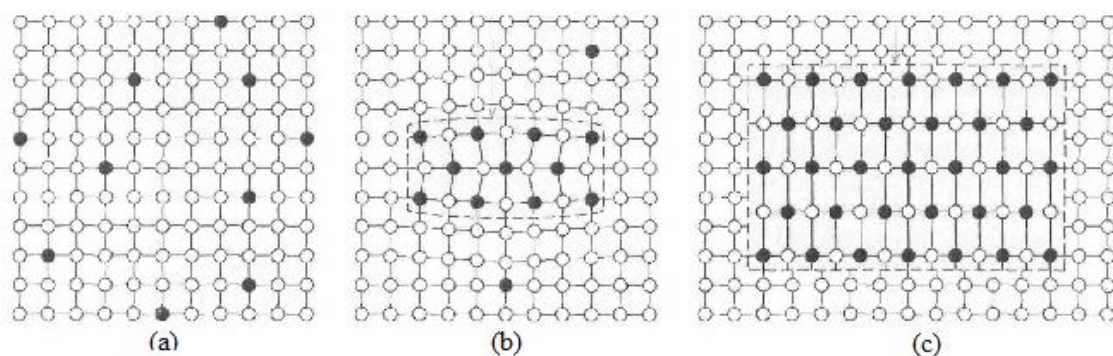


Figura 2.7: Representação esquemática de vários estágios do processo de formação do precipitado. (a) Solução sólida supersaturada. (b) Formação de uma fase metaestável de transição. (c) Precipitado em equilíbrio dentro de uma matriz. Fonte: Callister (2000).

A precipitação cria uma distorção no contorno e no interior das fases, de forma que durante a deformação plástica, os movimentos das discordâncias são efetivamente dificultados, como resultado dessas distorções a liga se torna mais dura e mais resistente. Tal fenômeno faz com que mais energia

seja gasta no processo de forçar que essas discordâncias caminhem através da fase ou a contornem, Karabay (2007).

Karabay (2007) faz uma distinção entre os tipos de precipitado que se formam durante o envelhecimento artificial e o superenvelhecimento da liga. Como apresentado na Figura 2,8, após um certo período de tratamento a liga começa a se fragilizar, isso ocorre devido ao crescimento exagerado dos precipitados durante o superenvelhecimento do material. Segundo Karabay (2007) o processo inicial de envelhecimento resulta de elementos que se difundiram em fases coerentes, como apresentado na Figura 2.8a. Fases coerentes são aquelas que distorcem a rede cristalina, mas que ainda estão completamente conectadas ao restante da estrutura da matriz. Precipitados que cresceram demais devido a alguma parcela de superenvelhecimento formam fases incoerentes, que praticamente não estão conectadas ao restante da rede cristalina (Figura 2.8c.), atuando no sentido de fragilizar o material, uma vez que não impedem o deslocamento das discordâncias da mesma maneira que uma fase coerente faz.

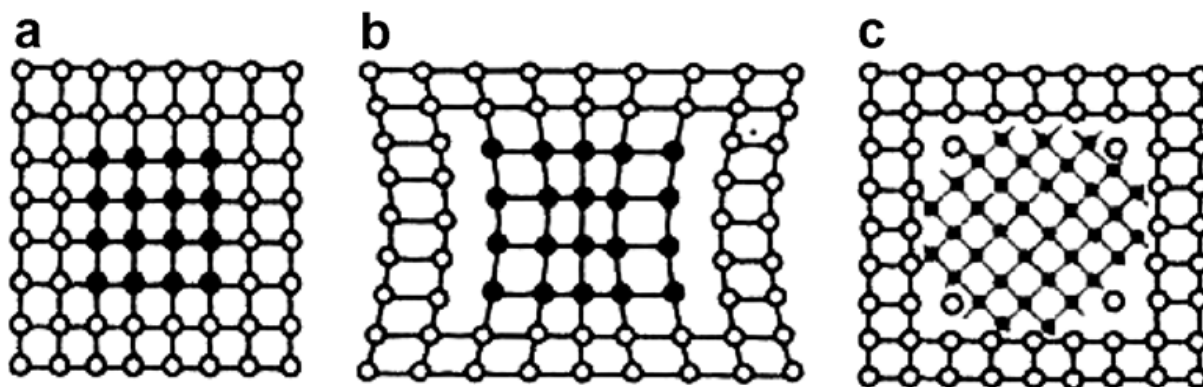


Figura 2.8: Estágio do endurecimento por precipitação da liga Al-Mg-Si. (a) Precipitados coerentes. (b) Precipitados semi coerentes. (c) Precipitados incoerentes formados devido ao excesso de envelhecimento. Kabrabay (2007).

2.7 FABRICAÇÃO DOS CABOS DE ALUMÍNIO LIGA 6201

A Tabela 2.1 apresenta as máximas quantidades que determinados elementos químicos que podem estar presentes nos cabos de alumínio liga 6201 de acordo com a *The Aluminium Association (1989)*.

Tabela 2.1: Quantidades máximas em porcentagem de massa de elementos de elementos de liga 6201

Principais Elementos de Liga	Quantidade em Porcentagem de Massa (%)
Cobre	0,10
Ferro	0,5
Silício	0,5 - 0,9
Manganês	0,03
Magnésio	0,6 – 0,9
Zinco	0,1
Cromo	0,03
Boro	0,06
Outros (cada)	0,03
Outros (total)	0,1

A liga 6201 é uma composta principalmente por alumínio, magnésio e silício. Outros elementos podem aparecer em escala reduzida (como apresentado na Tabela 2.1), e quase sempre são resultados de impurezas que contaminam a liga durante seu processo de fabricação. Os dois condutores utilizados durante o desenvolvimento desse trabalho (900MCM e 1055), são da liga 6201, portanto é possível saber as proporções aproximadas dos elementos constituintes desses cabos, porém os valores exatos não foram divulgados pelo fabricante.

Os diagramas apresentados nas Figuras 2.9 e 2.10 mostram a influência que os elementos de liga magnésio e silício tem sobre o ponto de fusão do alumínio. É possível observar que as faixas de concentração permitidas para fabricação de condutores com a liga 6201 atuam de maneira a diminuir o ponto de fusão do alumínio puro.

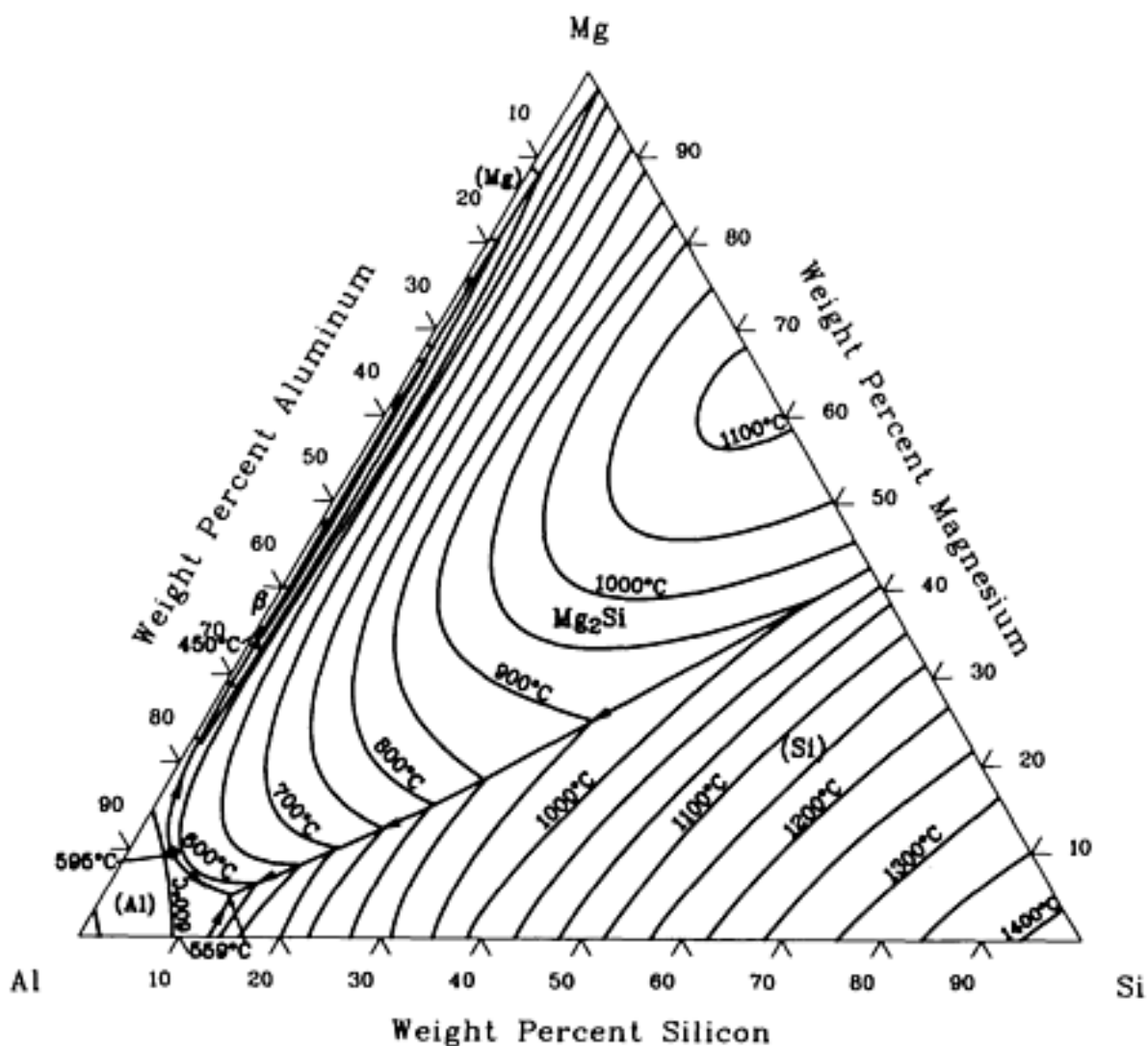


Figura 2.9: Diagrama de fases ternário da liga Al-Mg-Si. Fonte: ASM Metals Handbook Volume 3 (1992).

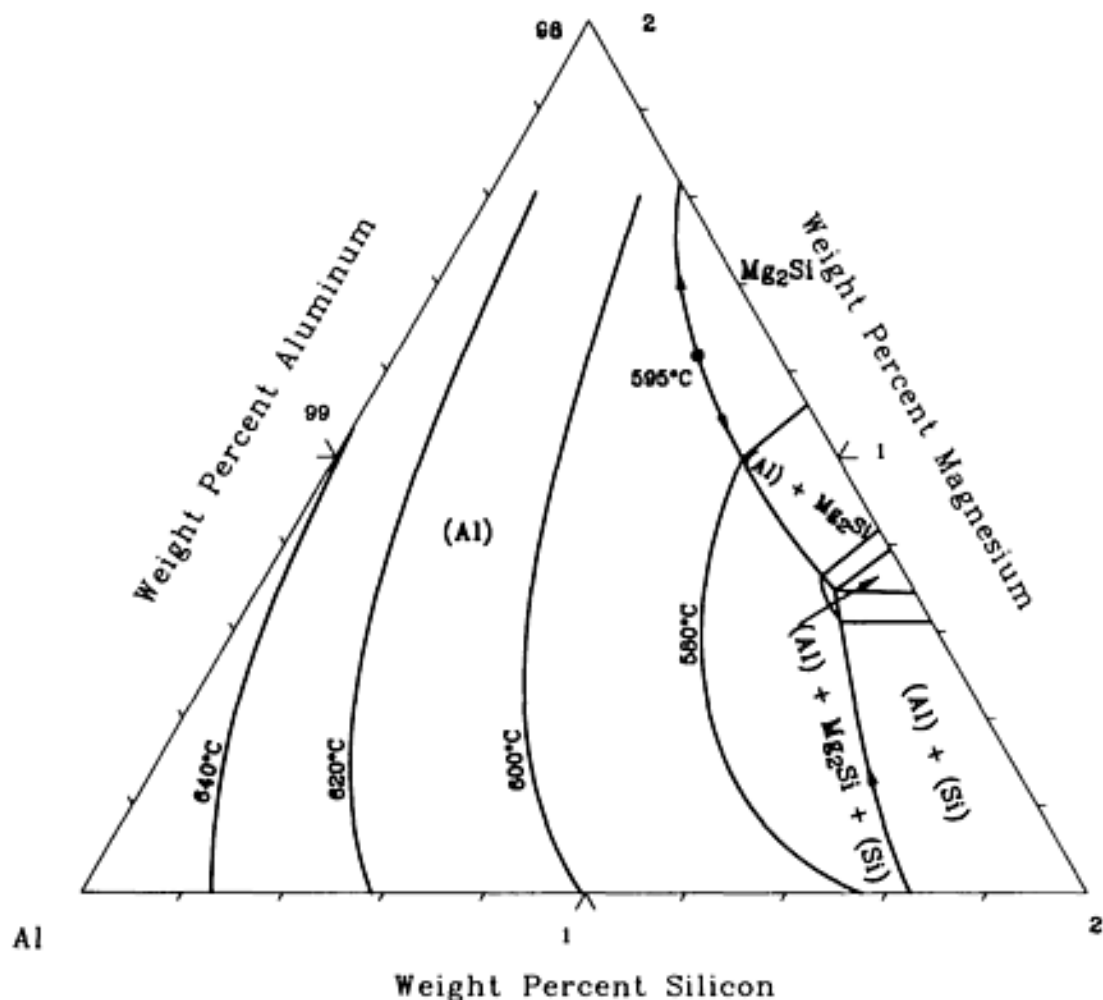


Figura 2.10: Diagrama de fases ternário da liga Al-Mg-Si. Fonte: ASM Metals Handbook Volume 3 (1992).

O processo de fabricação mais tradicional da liga 6201 é apresentado pela *The Aluminium Association* (1989), e mais detalhadamente por Karabay (2005). O processo se inicia com a fundição dos tarugos de alumínio que, após fundidos, recebem adição do elemento de liga Mg_2Si , adicionado à mistura dentro do próprio forno de fundição. Logo em seguida o metal fundido é vazado em moldes cilíndricos verticais e resfriado. Já em estado sólido, a liga é aquecida até a temperatura de 560°C e mantida nesse patamar por um período de 6 horas, o que favorece a homogeneização da estrutura cristalina do metal. É possível observar na Figura 2.10, que a temperatura de 560°C é muito próxima a temperatura de fusão dessa liga, o que garante uma alta difusão dos elementos de liga no estado sólido desse material. A precipitação do Mg_2Si começa a ser detectada aos 135°C. Entre 371°C e 426°C, o Mg_2Si remanescente aparece em pequenas *pellets*. Quando a temperatura de 482°C é atingida, a maioria do Mg_2Si já se difundiu completamente no metal sólido. O resfriamento da solução de alumínio deve ser feito rapidamente, a uma taxa superior a 95°C por minuto, para garantir que a solução sólida supersaturada de Magnésio e Silício permaneça diluída.

O envelhecimento artificial da liga é realizado a 175°C, em um ciclo único de 6 horas. Esse envelhecimento tem como objetivo a melhoria das propriedades mecânicas da liga, dentre elas é de particular interesse do setor elétrico que o limite de resistência à tração se eleve.

A liga é então esfriada, dando início ao processo de conformação mecânica que dará origem aos arames que compõem o condutor. O primeiro processo é a extrusão, que força a passagem do metal em uma seção menor que a sua própria. Esse processo pode ser feito uma ou repetidas vezes. Em seguida, o lingote é laminado para reduzir o diâmetro do metal e o aumento assim, seu comprimento. A próxima etapa é a trefilação, que origina os arames propriamente ditos. O último processo costuma ser o encordoamento, que força os arames a realizarem trajetórias helicoidais envolta de outro condutor, ou conjunto de condutores. O cabo pode então ser bobinado e seguir para a distribuição. Um diagrama simplificado do processo de fabricação dos cabos de alumínio liga 6201 é apresentado na Figura 2.11.

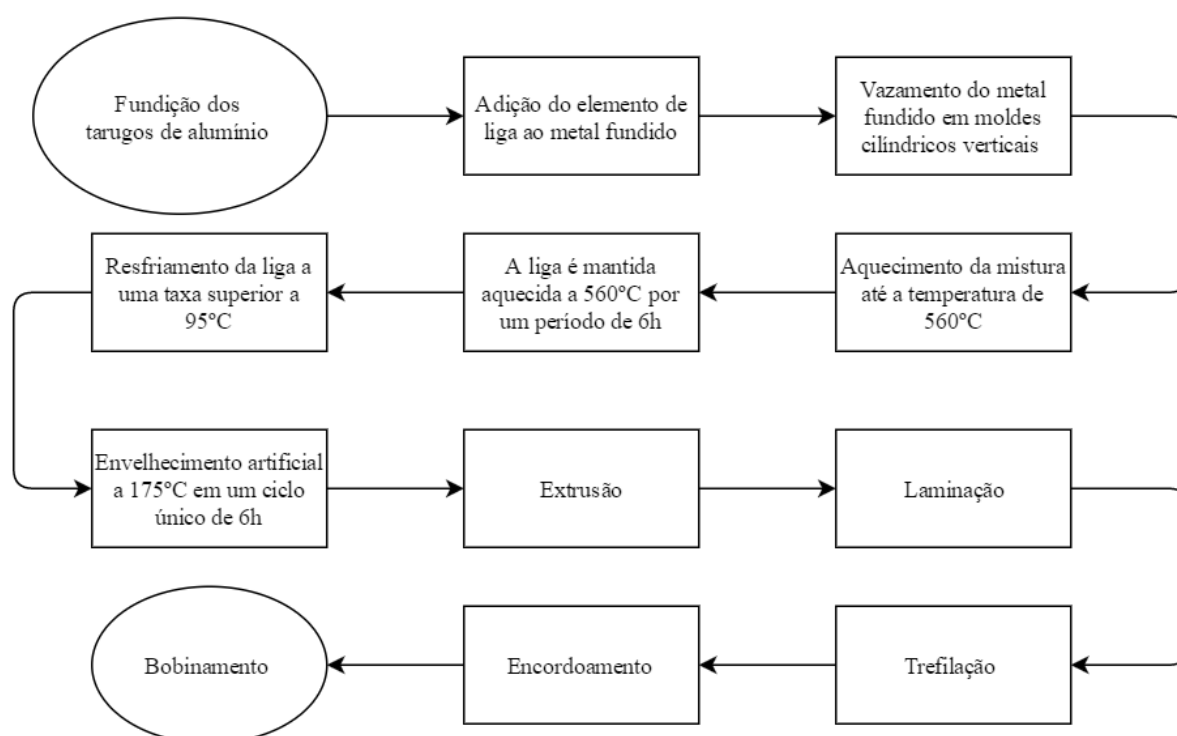


Figura 2.11: Fluxograma simplificado da fabricação de cabos de alumínio liga 6201.

Capítulo 3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados os procedimentos experimentais seguidos durante os tratamentos térmicos, ensaios metalográficos, ensaios de dureza, caracterização química e dos ensaios de tração dos arames dos cabos 900MCM e 1055, bem como uma descrição das características desses mesmos condutores.

3.2 CABO CONDUTOR

Para a realização dos experimentos foram utilizadas duas seções de cabos do fabricante Nexans, os modelos utilizados foram dois CAL (Cabo de Alumínio Liga), sendo eles o CAL 900MCM e o CAL 1055kcmil, cujas especificações das bobinas estão apresentadas no Apêndice C. Esses cabos foram fornecidos pelo fabricante ao laboratório de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília, para realização de ensaios diversos. As especificações de cada um dos condutores estão apresentadas nas Tabelas 3.1 e 3.2.

Tabela 3.1: Propriedades do cabo 900MCM. Fonte: Catálogo Nexans (2009)

Cabo	Seção transversal do condutor (mm ²)	Número de fios	Diâmetro do fio (mm)	Diâmetro do condutor (mm)	Massa aproximada (Kg/km)	Carga de ruptura (kgf)
900MCM	456,3	37	3,962	27,7	1251,9	13421,0

Tabela 3.2: Propriedades do cabo 1055. Fonte: Nexans (2009)

Cabo	Seção transversal do condutor (mm ²)	Número de fios	Diâmetro do fio (mm)	Diâmetro do condutor (mm)	Massa aproximada (Kg/km)	Carga de ruptura (kgf)
1055	534,5	61	3,34	30,06	1466	15549

A Nexans informa ainda que tanto o cabo 900MCM quanto o 1055 sofreram tratamentos térmicos T-81 e foram fabricados seguindo as recomendações da ASTM. Consultando a norma técnica ASTM B399/B399M de 2015 (*Standard Specification for Concentric-Lay-Stranded Aluminum-Alloy 6201-T81 Conductors*), pode-se observar que essa é uma liga de alumínio altamente resistente que foi tratada termicamente, trabalhada a frio e envelhecida artificialmente.

A ANSI H35.1 designa o tratamento térmico T-81 como a elevação do metal até a sua temperatura de solubilização, seguido pela estabilização dessa temperatura por tempo suficiente para que os constituintes de liga possam adentrar a solução sólida e depois o resfriamento do metal rapidamente a fim de manter os constituintes de liga no interior do metal sólido.

3.3 TRATAMENTOS TÉRMICOS

O tratamento térmico dos cabos condutores foi realizado em um forno mufla modelo Elektro Therm apresentado na Figura 3.1. Três tratamentos distintos foram utilizados para três pares de seções dos cabos, sendo que cada par de cabos era composto por um condutor 900MCM e um condutor 1055, ambos da fabricante Nexans.



Figura 3.1: Fornos Mufla do Laboratório de Engenharia Mecânica.

Todas as seis seções dos cabos foram colocadas no mesmo dia em um único forno. O controlador do forno foi ajustado de forma que esse pudesse ir da temperatura ambiente até a temperatura de 140°C durante o período de 20 minutos, após atingir esse patamar o forno passava 100h a 140°C, quando então se desligava. Assim que era desligado, o controlador (que foi fabricado para permanecer no máximo 100h em uma mesma temperatura sem se reiniciar), era religado manualmente. Esse ciclo se repetiu quatro vezes, totalizando 400h a uma temperatura de 140°C. Outros 2 ciclos menores (de 50h a 140°C), também ocorreram, totalizando 500h de funcionamento do forno a temperatura de 140°C.

O primeiro par de cabos foi retirado do forno no momento em que as primeiras 100h a 140°C foram completadas, o segundo par de cabos foi retirado com 250h a 140°C e o terceiro par foi retirado apenas ao final das 500h. O tempo que o forno permaneceu aberto para a retirada dos condutores nos ciclos de 100 e 250 horas foi inferior a 30 segundos, de forma a não comprometer o tratamento dos cabos

remanescentes. Ao serem removidos, os condutores resfriavam em repouso a temperatura ambiente. O Apêndice A apresenta um cronograma da utilização dos fornos mufla durante a realização dos tratamentos térmicos.

3.4 ENSAIOS DE TRAÇÃO

Para a realização dos ensaios de tração, o encordoamento dos cabos foi desfeito cuidadosamente, a fim de que se pudesse realizar ensaios individuais nos fios de cada uma de suas coroas, bem como no fio central. Após desencordado, cada camada de fio apresentou os formatos diferentes, as configurações dos arames do cabo 900MCM, após desencordado, estão apresentadas na Figura 3.2.

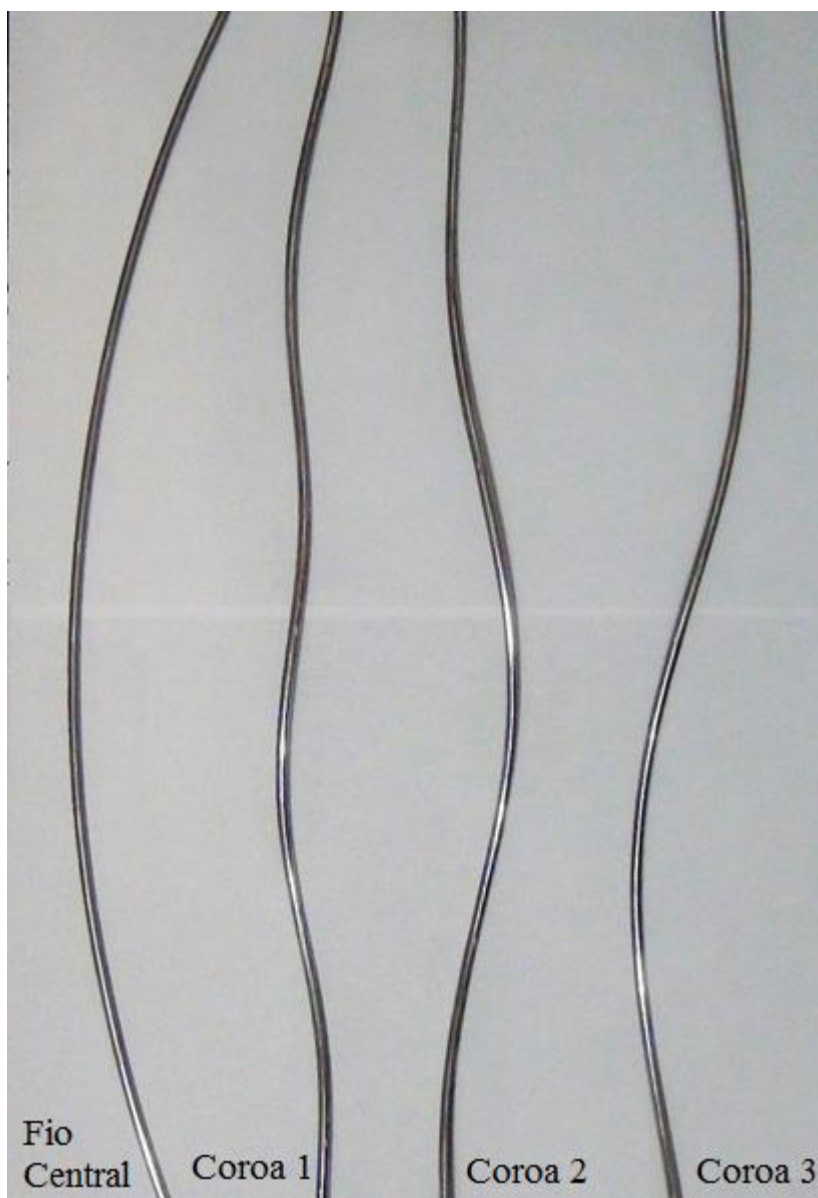


Figura 3.2: Perfil dos arames que compõe uma seção do cabo 900MCM, após desfeito o encordoamento.

Na Figura 3.2, da esquerda para a direita, tem-se respectivamente: fio central, primeira coroa, segunda coroa e terceira coroa. É possível notar a diferença no perfil individual de cada uma das coroas, causadas pelo encordoamento. O perfil dos fios não foi desfeito para a realização dos ensaios, ou seja, não houve nenhuma aplicação de pré-carga para forçar um alinhamento nos corpos de prova.

Após separados, cada arame foi etiquetado de acordo com seus principais parâmetros (modelo de cabo, tratamento térmico e posição ocupada quando encordado), e seccionado em diversas partes com aproximadamente 140mm de comprimento. O comprimento de 140mm foi estabelecido devido a limitações no comprimento total de cada seção de cabo que foi fornecida para a realização desse trabalho. Cada uma das seções se tornou um corpo de prova, que foram separados e catalogados em grupos de acordo com seus parâmetros.

Antes da realização dos ensaios de tração, o comprimento de cada corpo de prova foi medido e marcações foram realizadas indicando onde os mordentes (garras) da máquina de ensaios de tração deveriam se fixar ao fio ensaiado. Cada um dos dois mordentes utiliza um comprimento de aproximadamente 20mm do fio para realizar a fixação do mesmo, com isso, 100mm do corpo de prova foram utilizados como comprimento útil para a realização dos ensaios.

Para a tomada dos diâmetros dos fios, marcações de foram feitas a cada 10mm do comprimento útil de cada corpo de prova, e nesses pontos os diâmetros foram aferidos. As medições foram realizadas com um paquímetro analógico universal da fabricante Starrett, a partir dessas medições o valor médio do diâmetro de cada corpo de prova foi calculado. Os valores de diâmetro medidos, bem como os valores médios calculados, estão apresentados nos Apêndices B.1 ao B.8. A Figura 3.3 apresenta um corpo de prova com marcações em azul (indicando os locais em que os diâmetros eram aferidos), e em vermelho limitando o comprimento útil do corpo de prova.



Figura 3.3: Corpo de prova marcado para as tomadas de diâmetro.

O ensaio de tração foi realizado no laboratório de Engenharia Mecânica em uma máquina hidráulica uniaxial universal do fabricante MTS com capacidade de carga instalada de 500kg, interligada a um dispositivo virtual capaz de registrar as informações da célula de carga e dos deslocamentos sofridos pelos corpos de prova. A Figura 3.4 apresenta uma foto tirada durante um dos ensaios na máquina referida.

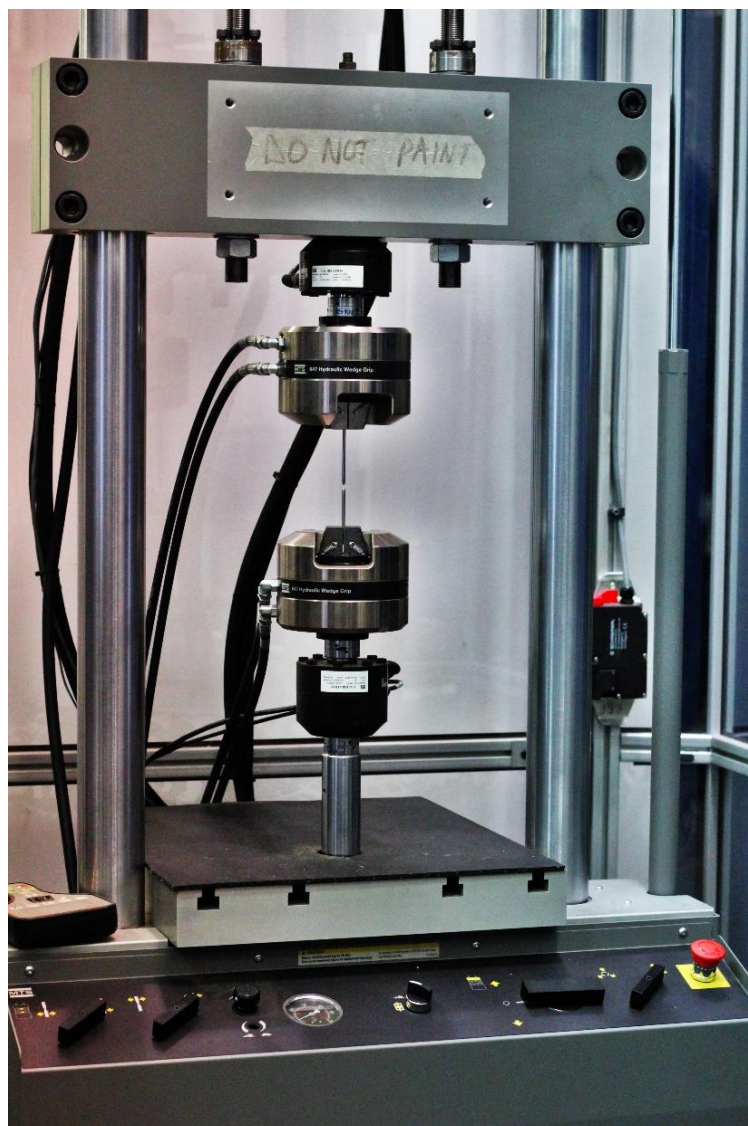


Figura 3.4: Máquina de ensaio universal MTS durante a realização de um ensaio de tração.

Os ensaios foram considerados válidos quando a ruptura do corpo de prova ocorria ao longo do comprimento útil do fio. Quando a ruptura ocorria nos mordentes ou imediatamente após os mordentes, o corpo de prova era descartado e o ensaio era tomado como falha. Foram realizados 23 ensaios testes para a calibração da máquina, durante esses testes foi possível observar que havia uma relação direta entre a pressão que os mordentes exerciam sobre o fio e a incidência da ruptura na região dos mordentes. Quanto menor a pressão nos mordentes, maior era a incidência de rupturas no comprimento útil do corpo de prova, uma vez que pressões elevadas ocasionavam deformações severas que fragilizavam o fio na região prensada.

A partir dos testes, uma pressão de aproximadamente 250psi (1,724 Mpa) foi instituída como a melhor pressão para a execução dos ensaios. A Figura 3.5 apresenta uma foto tirada do relógio calibrador de pressão da MTS indicando o valor estabelecido para os ensaios. Valores abaixo de 250psi acarretavam no deslizamento dos corpos de prova durante os ensaios de tração, invalidando o ensaio.



Figura 3.5: Medidor de pressão nos mordentes da máquina de ensaios universal MTS.

Foram realizados 5 ensaios válidos em cada coroa e 5 ensaios válidos em cada fio central, nos quais 40mm de cada fio eram utilizados para a fixação nos mordentes inferior e superior dos atuadores da máquina, e tracionados até a ruptura, como representado na Figura 3.6. Foram realizados 180 ensaios válidos e 239 ensaios ao total, considerando os testes. A máquina era controlada e monitorada via computador, através do software *Station Manager*. Esse programa possibilita a customização de inúmeras configurações para realizar diferentes ensaios de tração.



Figura 3.6: Arame de uma das camadas do cabo imediatamente após a ruptura.

O tempo de duração do ensaio é definido pela velocidade na qual o atuador inferior se desloca em relação ao superior, que permanece estático, tal velocidade foi escolhida mediante testes com vários valores da mesma. Após os testes, a velocidade de deslocamento do atuador foi definida como sendo de 2mm/min. Valores acima desse provocavam a ruptura do corpo de prova nas próprias garras de fixação dos atuadores, o que desqualificava o teste.

A interface do *Station Manager* é apresentada na Figura 3.7. O programa imprimia em tempo real uma curva de carga em função do deslocamento, bem como fornecia os valores de máxima carga que foram alcançados durante o ensaio e de deslocamento total. Após a ruptura de um corpo de prova, um arquivo .DAT é gerado com todos os valores de carga e deslocamento medidos durante o ensaio.

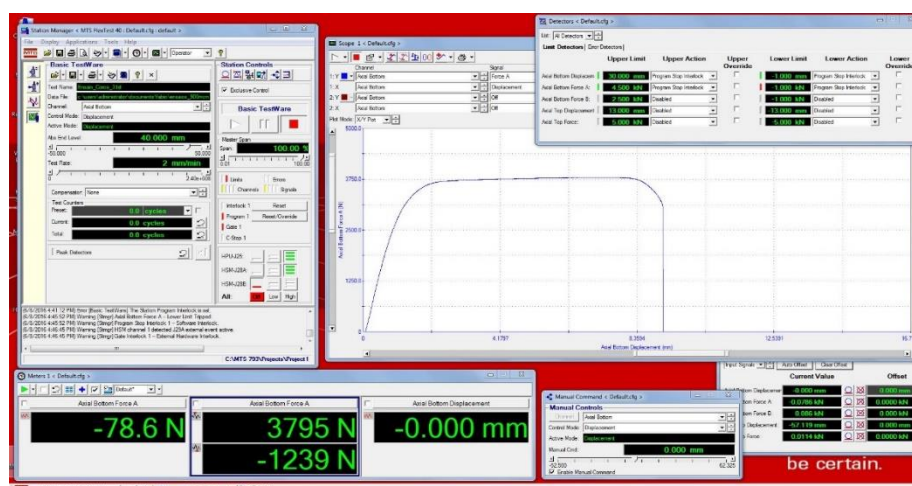


Figura 3.7: Imagem da tela, mostrando o software Sation Manager logo após a ruptura de uma amostra.

Após a ruptura, cada amostra era cuidadosamente retirada, prestando-se atenção para evitar que o ponto no qual a ruptura ocorreu não entrasse em contato com nenhuma superfície que pudesse comprometer os futuros testes cristalográficos que seriam realizados nos corpos de prova. Como ilustrado na Figura 3.8, o local da ruptura foi coberto por algodão e as duas partes dos corpos de prova foram unidas por uma fita adesiva, para evitar que se separem.



Figura 3.8: Corpos de prova catalogados, prontos para testes cristalográficos.

3.5 CARACTERIZAÇÃO TOPOGRÁFICA DAS FALHAS

O estudo tridimensional das falhas foi possível a partir da análise de imagens obtidas através da utilização da microscopia confocal. Por meio da emissão de feixes de laser, o Microscópio Confocal (Figura 3.9), capta diferenças topográficas nas falhas (obtidas nos ensaios de tração), e compõe uma imagem tridimensional do objeto em questão, possibilitando diferentes tipos de medições. Para o presente estudo foram avaliadas desigualdades entre o ponto inferior e superior da falha, além da medição das estricções causadas pelo empescoçamento da peça momentos antes à ruptura.



Figura 3.9: Microscópio Confocal do Laboratório do Departamento de Engenharia Mecânica da UnB.

Para a avaliação no Confocal as regiões das falhas foram seccionadas do restante dos corpos de prova. Para tal corte, marcações foram realizadas 20mm após o início do empescoçamento e nessas regiões os cortes foram realizados com o auxílio de um alicate universal.

Para uma avaliação mais precisa da falha, os corpos de prova precisam ficar na vertical, formando um ângulo de 90° com a mesa na qual o microscópio está fixado. Para tal posicionamento, as falhas foram colocadas em um porta amostras e com o auxílio de massa de modelar foram fixadas na vertical.

As análises foram feitas com uma lente que proporcionava um aumento de 20 vezes e para cada corpo de prova cerca de 2500 imagens foram feitas separadamente e compostas em uma única imagem tridimensional.

3.6 FRACTOGRAFIA

Utilizando um microscópio eletrônico de varredura (MEV), da marca JEOL modelo JSM-7100F apresentado na Figura 3.10, foi possível analisar o modo de falha presente em todos os corpos de prova submetidos aos ensaios de tração. Para tal análise, os corpos de prova já preparados durante a análise topográfica no Microscópio Confocal foram inseridos em um novo porta amostras e fixado no suporte

do MEV com o auxílio de uma fita adesiva. Após a produção do vácuo, foi possível obter as imagens almejadas.



Figura 3.10: Microscópio Eletrônico de Varredura do Departamento de Engenharia Mecânica.

3.7 METALOGRAFIA

Testes metalográficos foram realizados em todas as camadas dos condutores submetidos ou não aos tratamentos térmicos. Um Microscópio Óptico da marca Olympus modelo EX51 (Figura 3.11) foi utilizado para os testes, gerando imagens com ampliação de 500 e 1000 vezes.



Figura 3.11: Microscópio Óptico do Departamento de Engenharia Mecânica.

O preparo das amostras começou com o corte dos fios dos condutores a fim de possibilitar que eles pudessem ser embutidos em uma resina acrílica. O corte foi feito por meio de um disco circular refrigerado a água, com rotação de 2200rpm e avanço de 0,040mm/s, cara arame cortado ficou com 10mm de comprimento.

Uma mistura de 10g de resina em pó acrílica e 6ml de catalizador metil metacrilato foi preparada. Metade dessa mistura foi depositada em um recipiente de silicone e após 2 minutos de repouso os arames recém cortados foram parcialmente embutidos, o restante da mistura foi adicionada ao recipiente, cobrindo totalmente os arames. As amostras só foram retiradas do recipiente de silicone após a total solidificação da resina. Foram preparadas 8 amostras (4 para o 900MCM e 4 para o 1055), sendo que cada modelo de condutor possuía 3 amostras que foram submetidas aos diferentes tratamentos térmicos e 1 amostra que não havia passado por nenhum ciclo térmico.

Depois de embutidas, uma das faces das amostras foram lixadas em uma politriz, passando por lixas d'água de granulometria 220, 400, 600, 800 e 1200, nessa ordem. Ao final, cada amostra foi polida em um pano umedecido com uma solução de alumina de $1\mu m$. Anteriormente o polimento havia sido realizado em pano com pasta de diamante de $0,1\mu m$, mas a partir de uma análise no microscópio óptico foi possível observar que esse processo deixava marcas e arranhões na superfície polida do metal, tornando o polimento com alumina mais apropriado.

Após polidas, as superfícies das amostras foram atacadas quimicamente. Utilizando indicações encontradas em literaturas. Alguns ataques químicos foram testados sem sucesso, gerando uma superfície manchada ou sem evidenciar as fases presentes na liga metálica. Tais ataques foram:

- 20 segundos submerso em solução a 20% de ácido perclórico (HClO_4) a 60°C;
- 60 segundos submerso em solução a 30% de ácido nítrico (HNO_3) posteriormente 30 segundos em solução de metanol a 70%;
- 60 segundos em solução de 2,5ml de ácido tetrafluorobórico (HBF_4) a 48% em 100ml de água destilada a 60°C;
- 20 segundos submerso em uma solução de 4g de permanganato de potássio em 100ml de água destilada e 1g de hidróxido de sódio (NaOH).

Antes de realizar cada teste com um novo reagente as amostras eram lixadas novamente em uma lixa d'água de granulometria 1200 e polidas novamente em alumina.

Como indicado pelo ASM Handbook (1992), ataques com os reagentes Keller, hidróxido de sódio ou ácido fluorídrico são indicados para evidenciar as fases da liga 6201, através do escurecimento do composto intermetálico Mg_2Si . Seguindo a sugestão de Liu (1999) os 3 reagentes foram utilizados em ordem, nas seguintes proporções e tempos:

1. Submersão por 30 segundos em solução a 5% de hidróxido de sódio (NaOH);
2. Submersão por 60 segundos em solução de Keller (2ml de ácido fluorídrico (HF) 48%, 3ml de ácido clorídrico (HCl), 5ml de ácido nítrico (HNO_3) em 190ml de água destilada;
3. Submersão por 30 segundos em solução de ácido fluorídrico (HF) a 3%.

Conforme esperado ocorreu o escurecimento das fases da liga 6201. A partir desse resultado, todas as outras amostras foram atacadas segundo o procedimento apresentado anteriormente e preparadas para os testes metalográficos.

3.8 ESPECTROSCOPIA DE ENERGIA DISPERSIVA (EDS)

O Microscópio Eletrônico de Varredura apresentado na Seção 3.6 foi novamente utilizado para a realização de uma caracterização química através da técnica de Espectroscopia de Energia Dispersiva. Essa técnica emite um feixe de partículas carregadas sobre a matéria que por sua vez emite raios X em resposta. Através da análise dos raios X liberados devido a essa excitação, pode-se identificar o elemento químico constituinte do material em análise, devido a resposta única que cada estrutura atômica possui.

As amostras preparadas para os ensaios de Espectroscopia de Energia Dispersiva tiveram as faces opostas às que foram atacadas quimicamente lixadas. O objetivo desse novo lixamento foi garantir que o metal embutido atravessasse a resina solidificada, possibilitando a condução de corrente elétrica. As novas amostras foram fixadas no suporte do MEV com fita adesiva condutora e submetidas a vácuo para que o ensaio pudesse ser iniciado.

Capítulo 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos pelos ensaios de tração, micrografia confocal, fractografia, metalografia e de espectroscopia de energia dispersiva. Também será realizada uma análise dos diversos comportamentos evidenciados por esses experimentos.

4.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO

O *Station Manager* (programa de controle da MTS) fornece os valores dos picos de força à qual o corpo de prova foi submetido ao ter seu comprimento alongado a uma taxa constante. Esses picos representam a carga máxima que cada corpo de prova suportou antes de romper. Usualmente, o valor dessa carga é utilizado para calcular o limite de resistência à tração do corpo de prova, como apresentado na seção 2.2.

As médias dos valores do limite de resistência à tração de engenharia calculados em cada um dos testes de tração, para cada camada e para cada tratamento térmico, são apresentados na Tabela 4.1. Para obtenção desses valores, a carga máxima suportada por cada amostra (Apêndices B.9 e B.10) foi dividida pela área da seção transversal dos fios calculadas através dos diâmetros apresentados nos Apêndices B.1 a B.8. Foi considerado que as seções dos fios são perfeitamente circulares. O erro da máquina universal de ensaios de tração MTS é de $\pm 0,5\%$ da carga medida. O erro associado à medida dos valores médios de resistência à tração de cada fio estão apresentados no Apêndice B.19.

Tabela 4.1: Valores médios obtidos para as resistências à tração de cada fio.

Modelo do Condutor	Tratamento Térmico	Fio Central (MPa)	Coroa 1 (MPa)	Coroa 2 (MPa)	Coroa 3 (MPa)	Coroa 4 (MPa)
900MCM	-	304,94	324,89	317,16	309,01	-
	100h	248,91	256,56	251,65	250,21	-
	250h	231,85	233,05	231,74	232,26	-
	500h	220,05	222,55	222,16	220,51	-
1055	-	326,37	323,96	321,27	325,38	319,86
	100h	262,50	260,44	258,85	261,59	264,37
	250h	243,24	242,14	242,54	242,63	242,19
	500h	232,41	230,89	232,79	233,65	231,38

Os resultados obtidos em cada ensaio não são próprios para a elaboração de uma curva tensão-deformação, uma vez que os deslocamentos medidos não correspondem a um valor verdadeiro, pois parte desse deslocamento foi realizado para esticar o arame do condutor, que não estava alinhado devido ao encordoamento.

A Figura 4.1 e a Figura 4.2 ilustram as variações médias das resistências à tração para cada fio em cada tipo de tratamento térmico.

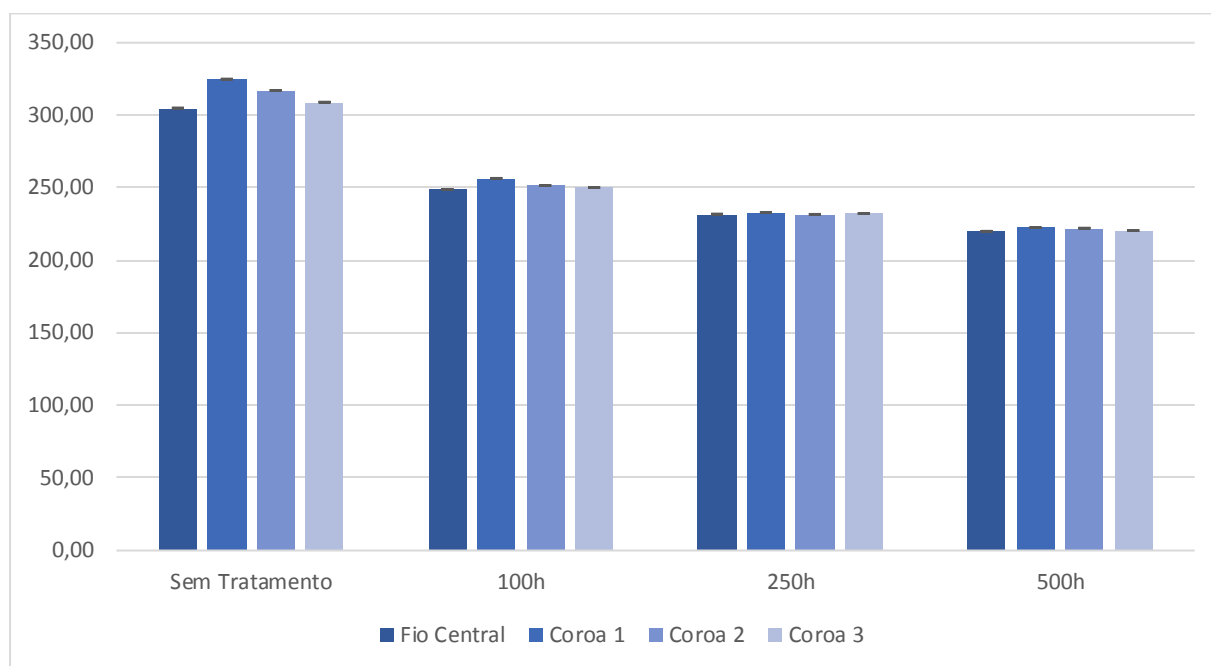


Figura 4.1: Valores médios de resistência à tração do condutor 900MCM em MPa.

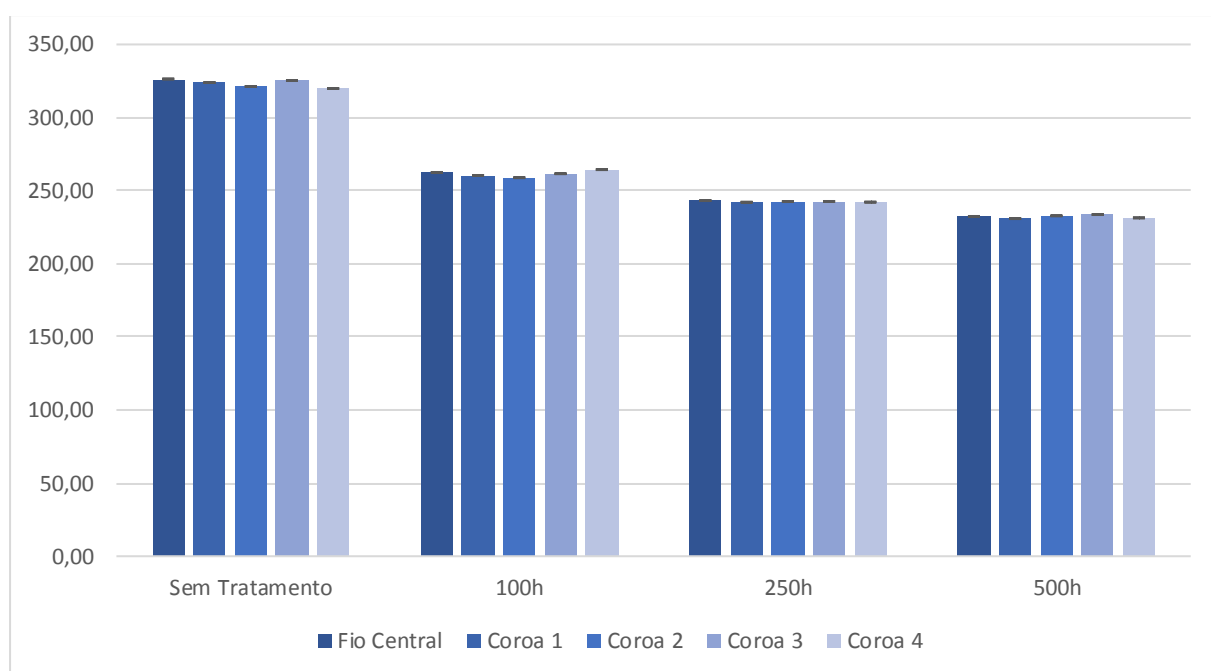


Figura 4.2: Valores médios de resistência à tração do condutor 1055 em MPa.

Os decréscimos, em porcentagem, das médias das resistências à tração para cada caso estudado tomando como parâmetro o cabo que não passou por nenhum tratamento, são apresentados na Tabela 4.2, bem como as médias e os desvios padrões dos valores calculados.

Tabela 4.2: Redução da média dos limites de resistência à tração.

Modelo do Condutor	Tratamento Térmico	Fio Central (%)	Coroa 1 (%)	Coroa 2 (%)	Coroa 3 (%)	Coroa 4 (%)	Média	Des. Pad.
900MCM	100h	18,37	21,03	20,65	19,03	-	19,77	1,28
	250h	23,97	28,27	26,93	24,84	-	26,00	1,96
	500h	27,84	31,50	29,95	28,64	-	29,48	1,60
1055	100h	19,57	19,61	19,43	19,61	17,35	19,11	0,99
	250h	25,47	25,25	24,50	25,43	24,28	24,99	0,55
	500h	28,79	28,73	27,54	28,19	27,66	28,18	0,58

É possível visualizar na Tabela 4.2 que o tratamento térmico realmente surtiu efeito na liga, atuando de forma a diminuir em cerca de 30% os limites de resistência à tração dos arames que compõe o condutor quando submetidos a 500h de tratamento. Também se verificou que a redução percentual desse parâmetro ocorreu de maneira mais intensa nas primeiras 100h de tratamento (cerca de 20% de redução), e que a taxa de decréscimo se reduziu entre 100 e 250h, diminuindo mais ainda entre 250 e 500h.

4.3 RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO TOPOGRÁFICA

Através do uso do Microscópio Confocal foi possível analisar o formato das diversas falhas e comparar os resultados para cada tratamento térmico. O *software* LEXT permite a realização de diversas medições, dentre elas a distância entre o pico topográfico da falha e a região de vale da mesma. E esse valor unido ao valor do diâmetro do fio possibilita uma estimativa do ângulo de propagação da trinca, que originou a falha, com relação ao eixo de tração. Os valores da distância entre o pico e o vale de todas as falhas são apresentados nos Apêndices B.11 e B.12, e os erros associados a cada uma dessas medidas é apresentado no Apêndices B.17 e B.18.

A imagem tridimensional apresentada pelo Microscópio Confocal é apresentada na Figura 4.3a, a fim de melhorar a visualização e a análise da imagem uma escala de cores foi adotada, como apresentado na Figura 4.3b. A região que aparece ao entorno da falha é uma região de ruído.

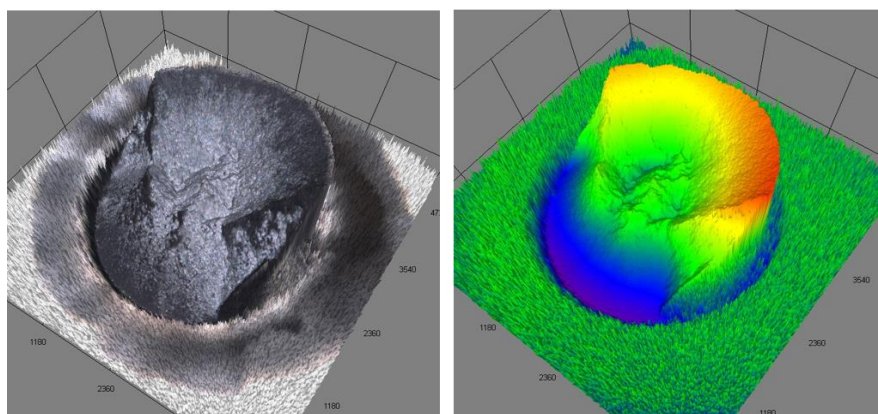


Figura 4.3: Imagem tridimensional gerada antes e após utilização de uma escala de cores

A análise das imagens geradas pela micrografia confocal possibilitou observar que, assim como esperado, a falha ocorre devido a propagação de trincas que se iniciam ao redor do perímetro externo do pescoço, por deformação cisalhante em um ângulo de aproximadamente 45° com o eixo de torção, uma característica de falhas dúcteis.

A Figura 4.4 apresenta uma foto representativa da falha das coroas do cabo 900MCM para cada tipo de tratamento térmico. É possível observar que não há uma mudança perceptível de comportamento do modo de falha para nenhum dos condutores ensaiados.

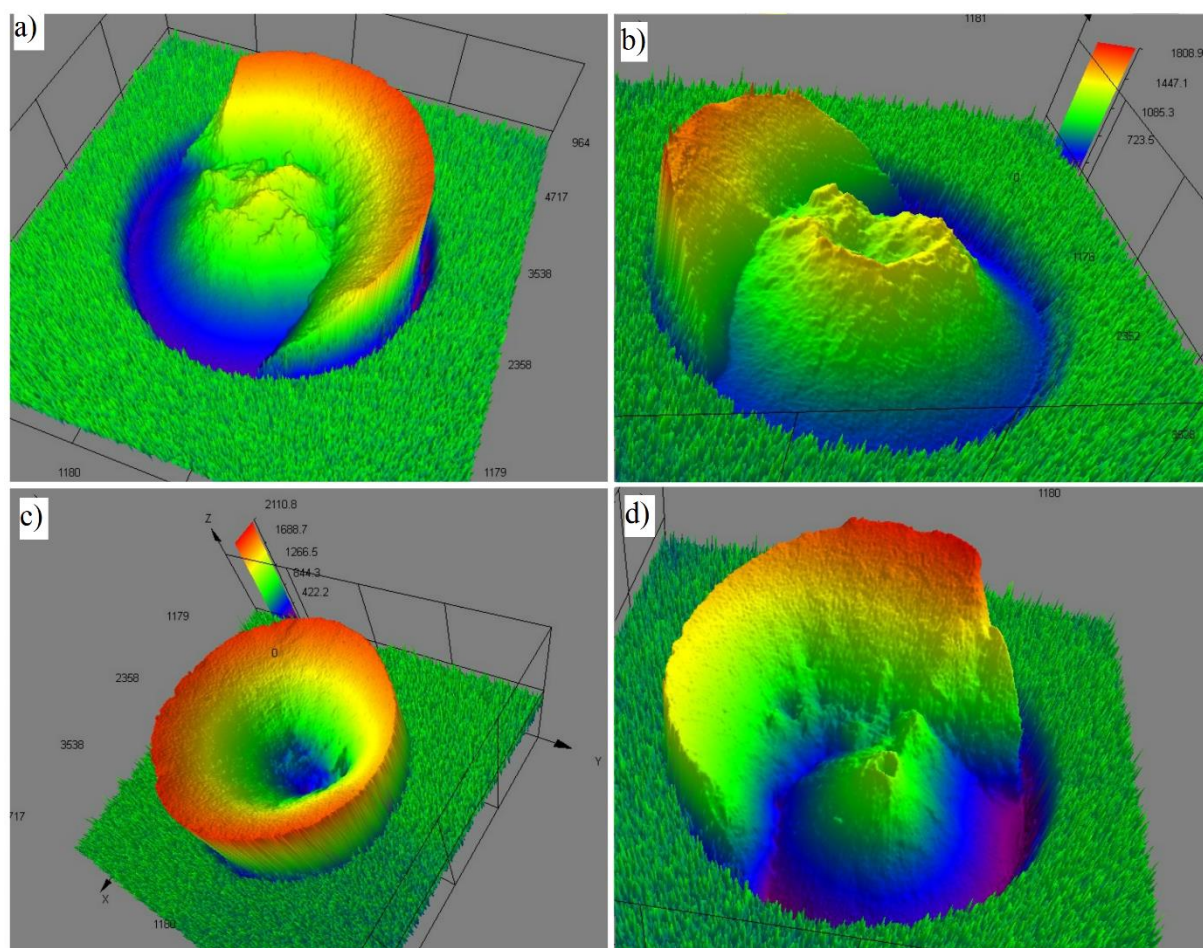


Figura 4.4: Detalhe das falhas do CAL 900MCM. (a) Sem tratamento térmico. (b) Com tratamento de 100h. (c) Com tratamento de 250h. d) Com tratamento de 500h.

As imagens da Figura 4.4 revelam uma região central irregular fibrosa nas falhas, o que é, segundo Callister (2000), um indicativo de deformação plástica, típico de falhas dúcteis, uma vez que esse modo de falha é caracterizado por uma extensa deformação plástica na vizinhança de uma trinca que está avançando. As Figuras 4.4c apresenta uma fratura com contorno superficial característico completo, conhecido como taça e cone, outra característica típica de fraturas dúcteis.

A Figura 4.5 apresenta uma imagem representativa das falhas do cabo 1055 antes e após os tratamentos térmicos.

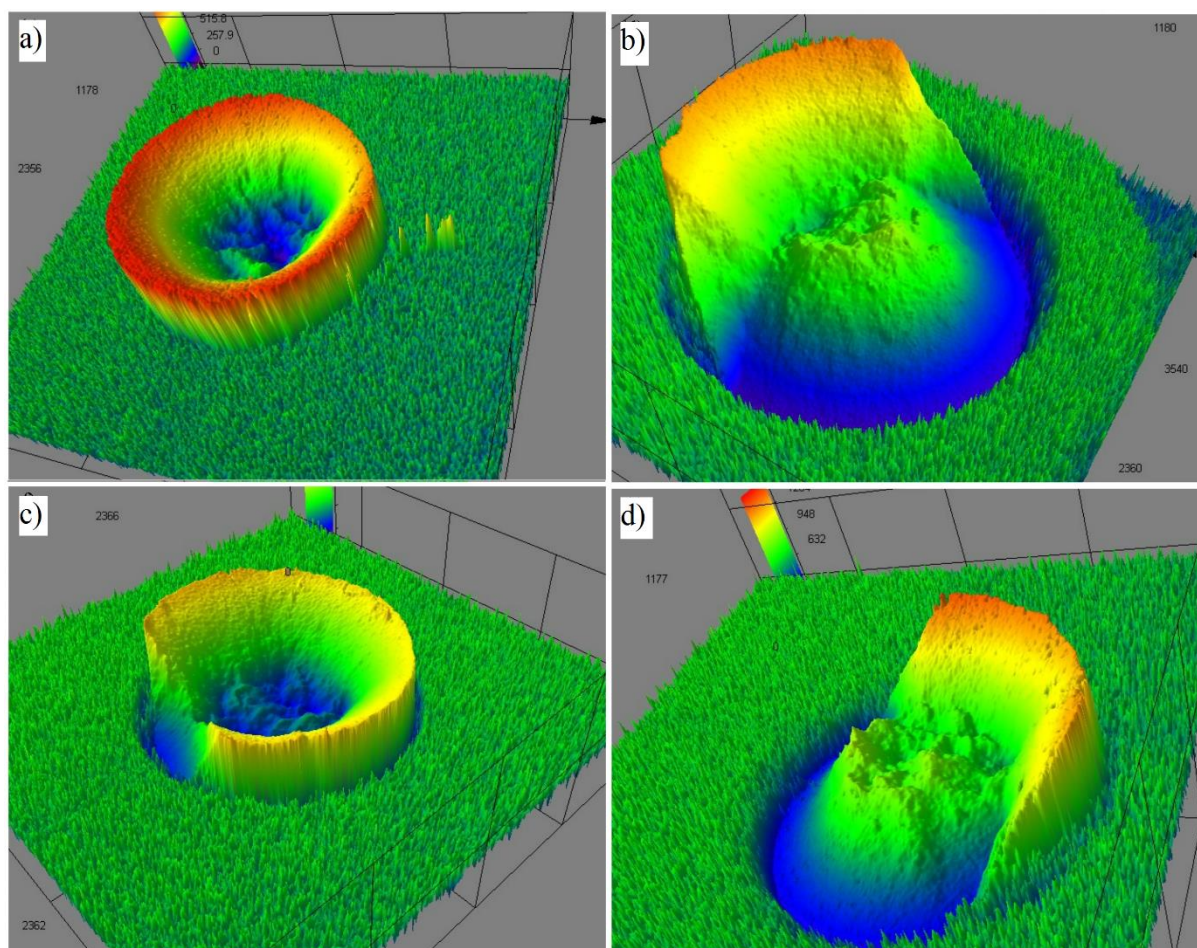


Figura 4.5: Detalhe das falhas do CAL 1055. (a) Sem tratamento térmico. (b) Com tratamento de 100h. (c) Com tratamento de 250h. d) Com tratamento de 500h.

Através da utilização das ferramentas de medição do programa de controle do Microscópio Confocal foi possível medir o diâmetro das regiões de empescoamento apresentadas por cada corpo de prova logo antes da ruptura. As médias desses valores estão apresentadas na Tabela 4.3. Segundo Callister (2000), essa estricção é mais evidente quanto mais dúctil for o material, portanto, a partir da comparação dos valores da estricção dos cabos como recebidos e depois dos tratamentos, pode-se avaliar alterações na ductilidade do material induzidas pelo ciclo térmico.

Tabela 4.3: Valores médios dos diâmetros apresentados pelas estricções.

Modelo do Condutor	Tratamento Térmico	Fio Central (μm)	Coroa 1 (μm)	Coroa 2 (μm)	Coroa 3 (μm)	Coroa 4 (μm)
900MCM	-	2.861,80	2.821,05	2.826,01	2.838,31	-
	100h	2.622,73	2.617,28	2.610,68	2.627,09	-
	250h	2.567,14	2.543,00	2.556,67	2.557,00	-
	500h	2.508,54	2.520,72	2.500,40	2.508,93	-
1055	-	2.296,36	2.271,37	2.265,15	2.270,50	2.263,31
	100h	2.127,11	2.141,44	2.160,06	2.132,60	2.147,66
	250h	2.080,08	2.091,57	2.095,07	2.106,52	2.108,47
	500h	1.938,37	2.004,04	1.959,62	1.986,83	1.955,09

Os valores dos diâmetros das regiões de estricção medidos para cada corpo de prova estão apresentados nos Apêndices B.13 e B.14. É possível visualizar na Tabela 4.3 que existe uma redução gradual das estricções a medida que se aumenta a duração dos tratamentos térmicos. Tal efeito evidencia que de fato ocorre um aumento de ductilidade nos arames ocasionado pelos ciclos térmicos. O decréscimo percentual das médias dos diâmetros das estricções é apresentado na Tabela 4.4, tais valores foram obtidos tomando como base diâmetro das estricções nas falhas dos cabos como recebidos.

Tabela 4.4: Redução percentual das estricções

Modelo do Condutor	Tratamento Térmico	Fio Central (%)	Coroa 1 (%)	Coroa 2 (%)	Coroa 3 (%)	Coroa 4 (%)	Média	Des. Pad.
900MCM	100h	8,35	7,22	7,62	7,44	-	7,66	0,49
	250h	10,30	9,86	9,53	9,91	-	9,90	0,31
	500h	12,34	10,65	11,52	11,60	-	11,53	0,70
1055	100h	7,37	5,72	4,64	6,07	5,11	5,78	1,05
	250h	9,42	7,92	7,51	7,22	6,84	7,78	1,00
	500h	15,59	11,77	13,49	12,49	13,62	13,39	1,44

4.4 RESULTADOS DA FRACTOGRAFIA

O objetivo de se realizar uma análise de fractografia no MEV foi analisar de maneira mais detalhada o mecanismo de fratura, observando se as falhas realmente foram totalmente dúcteis em toda sua extensão, como já indicavam os resultados obtidos no Microscópio Confocal. Também era preciso verificar se houve alguma diferença perceptível na fratura causada pelos tratamentos térmicos.

Na Figura 4.6 é apresentada a ampliação de 4 pontos distintos da topografia da falha do corpo de prova 1 da primeira coroa do condutor 900MCM que não foi submetido a nenhum tratamento térmico, as setas indicam o ponto no qual foram aplicados uma ampliação de 1200 vezes. A análise da imagem permite observar uma superfície coberta por microcavidades (*dimples*), que são estruturas características de falhas dúcteis, formadas após a separação dos microvazios durante o processo de falha. A região central fibrosa é constituída de numerosas microcavidades esféricas, enquanto as demais regiões são formadas por microcavidades com formato alongado e parabólico, o que é um indicativo de falha por cisalhamento, que se formam ao longo do plano de tensão cisalhante, Callister (2000).

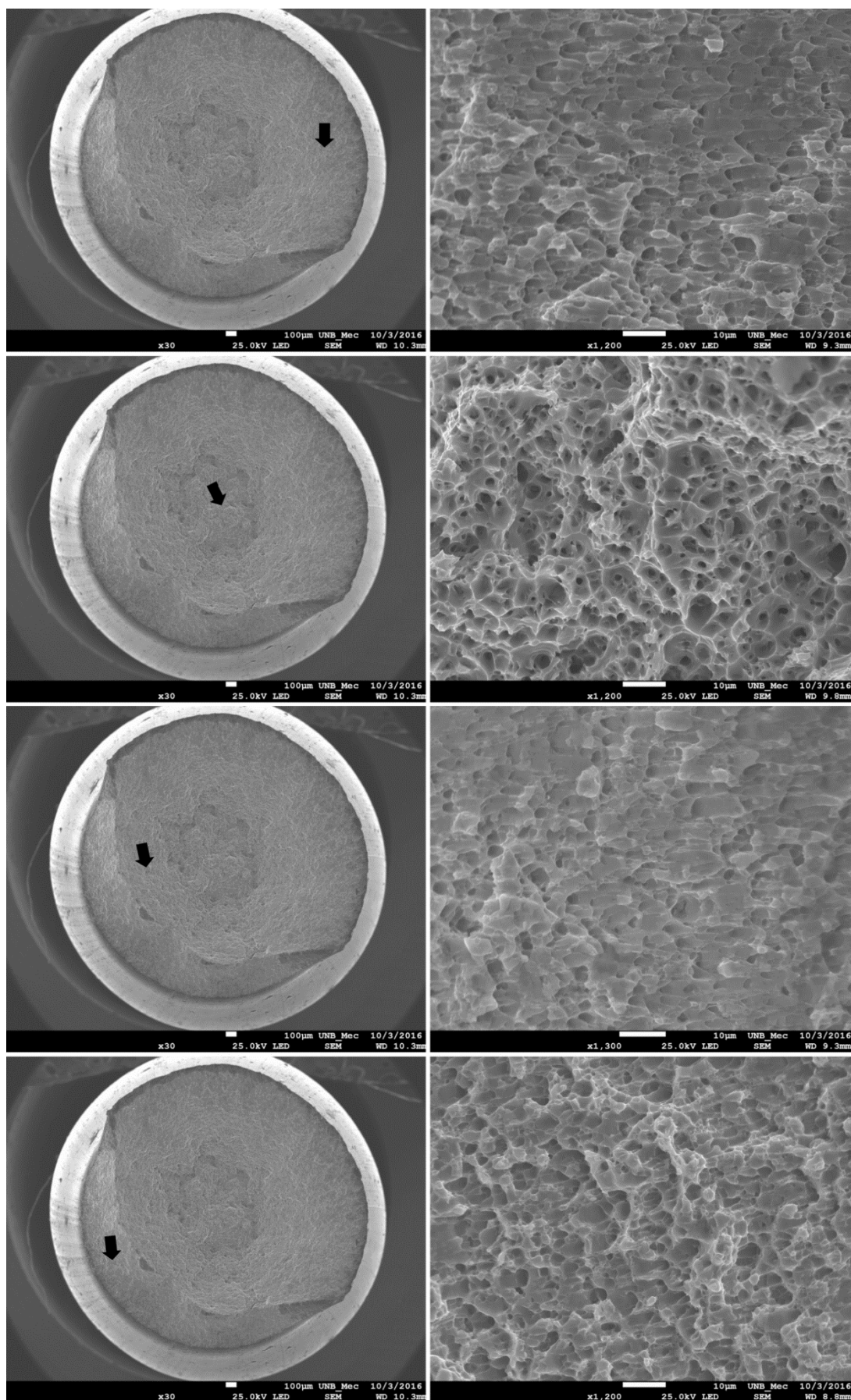


Figura 4.6: 900MCM ampliado 30 vezes (esquerda). Ampliação de 1200 nas indicações (direita)

A fratura do corpo de prova apresentado na Figura 4.6 foi observada com ampliação de 1200 vezes em mais outros 14 pontos além dos apresentados na mesma, e não houve nenhum local em que se observou uma estrutura diferente das microcavidades expostas anteriormente. As demais amostras (tanto as sem tratamento térmico quanto as com tratamento), também foram analisadas sob a mesma ampliação e não se observou nenhuma diferença visualmente perceptível para nenhuma delas.

A Figura 4.7 apresenta uma imagem gerada com ampliação de 1200 vezes das regiões centrais de amostras representativas do condutor 900MCM sem passar por nenhum tratamento térmico e após passar pelos tratamentos.

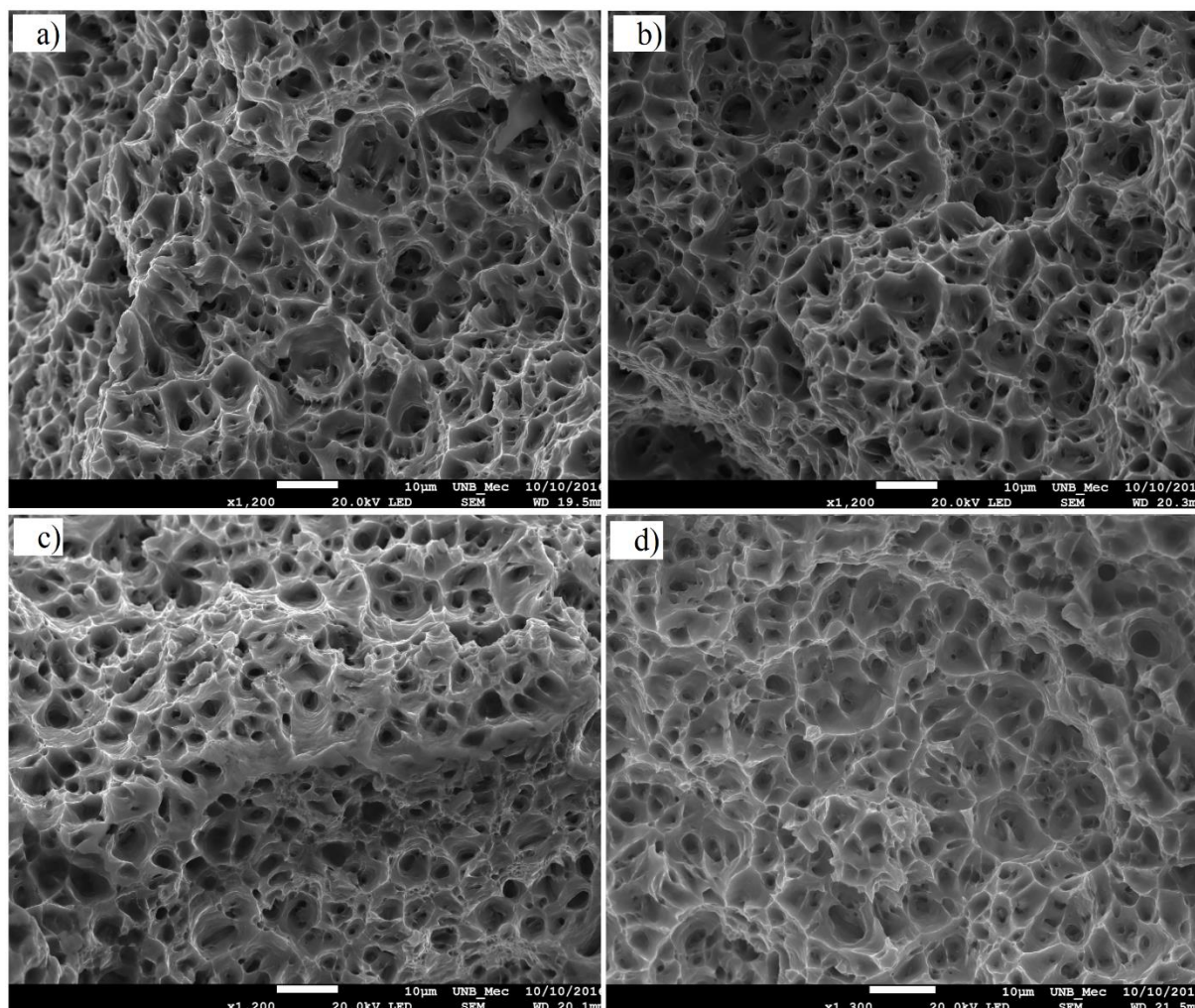


Figura 4.7: Ampliação de 1200 vezes da região central da falha. (a) Sem tratamento. (b) Com tratamento de 100h. (c) Com tratamento de 250h. (d) Com tratamento de 500h.

Como é possível observar na Figura 4.7 não há uma alteração perceptível na morfologia dos *dimples*. A Figura 4.8 apresenta 4 amostras representativas do condutor 1055 sem passar por tratamentos térmicos e após a realização dos tratamentos.

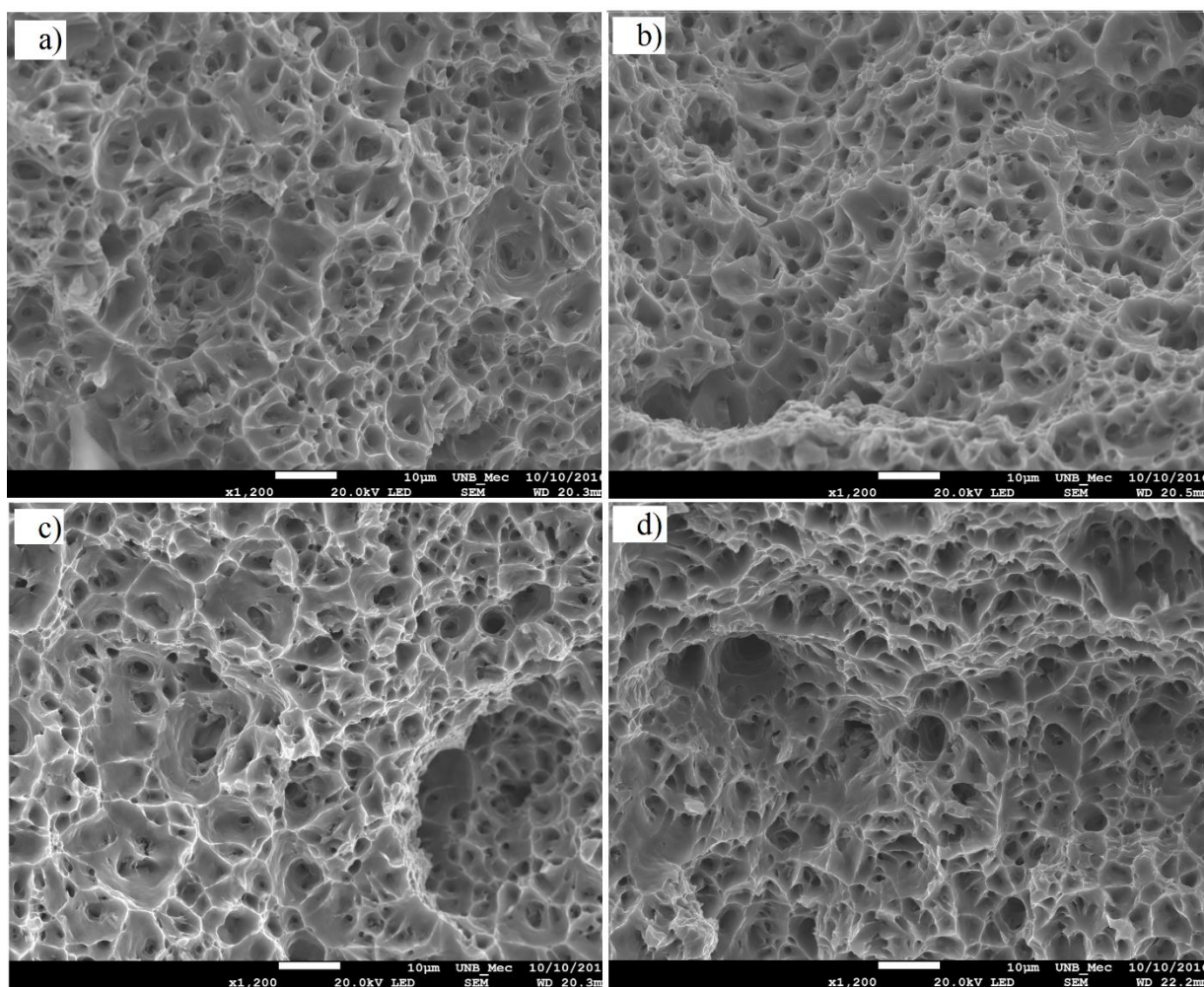


Figura 4.8: Ampliação de 1200 vezes da região central da falha. (a) Sem tratamento. (b) Com tratamento de 100h. (c) Com tratamento de 250h. (d) Com tratamento de 500h.

Da mesma forma que foi apresentado na Figura 4.7, a Figura 4.8 não aparenta possuir nenhuma modificação perceptível, na formação dos *dimples*, oriunda dos tratamentos térmicos realizados nos condutores.

A fim de possibilitar uma análise mais profunda do mecanismo de falha apresentado pelas amostras, utilizou-se o programa ImageJ para realizar uma quantificação das características morfológicas dos *dimples* (diâmetro médio, área média e quantidade total de microcavidades na falha).

O ImageJ utiliza uma série de algoritmos que diferenciam as tonalidades de cores presentes nas imagens as quais se pretende realizar uma análise, em seguida o programa gera diferentes quantidades de imagens tonalidade preto e branco de acordo com a especificação do algoritmo utilizado. Ao rodar o programa utilizando uma combinação de todos seus algoritmos, um total de 24 novas imagens em preto e branco são geradas, essa foi a opção escolhida para ser utilizada nesse estudo, uma vez que proporciona a maior quantidade de imagens para servirem de opção no início da análise, o que pode diminuir o tempo de edição das imagens e gerar um modelo mais próximo da realidade. A partir dessas imagens, escolhe-se a que melhor se aproxima da original para que então se possa realizar correções manuais até que a imagem esteja próxima o suficiente da realidade. A análise é então realizada na imagem corrigida.

O ImageJ consegue processar apenas bits em preto e branco, por isso se torna necessário seguir o procedimento apresentado anteriormente. Após a correção manual da imagem, o ImageJ realiza uma contagem dos bits pretos presentes na imagem e através de uma escala definida pelo operador do programa (para as imagens analisadas 710 pixels correspondem a 10 μ m), pode-se realizar medições como as das áreas das manchas pretas. A Figura 4.9 apresenta 24 imagens geradas automaticamente a partir de uma imagem original.

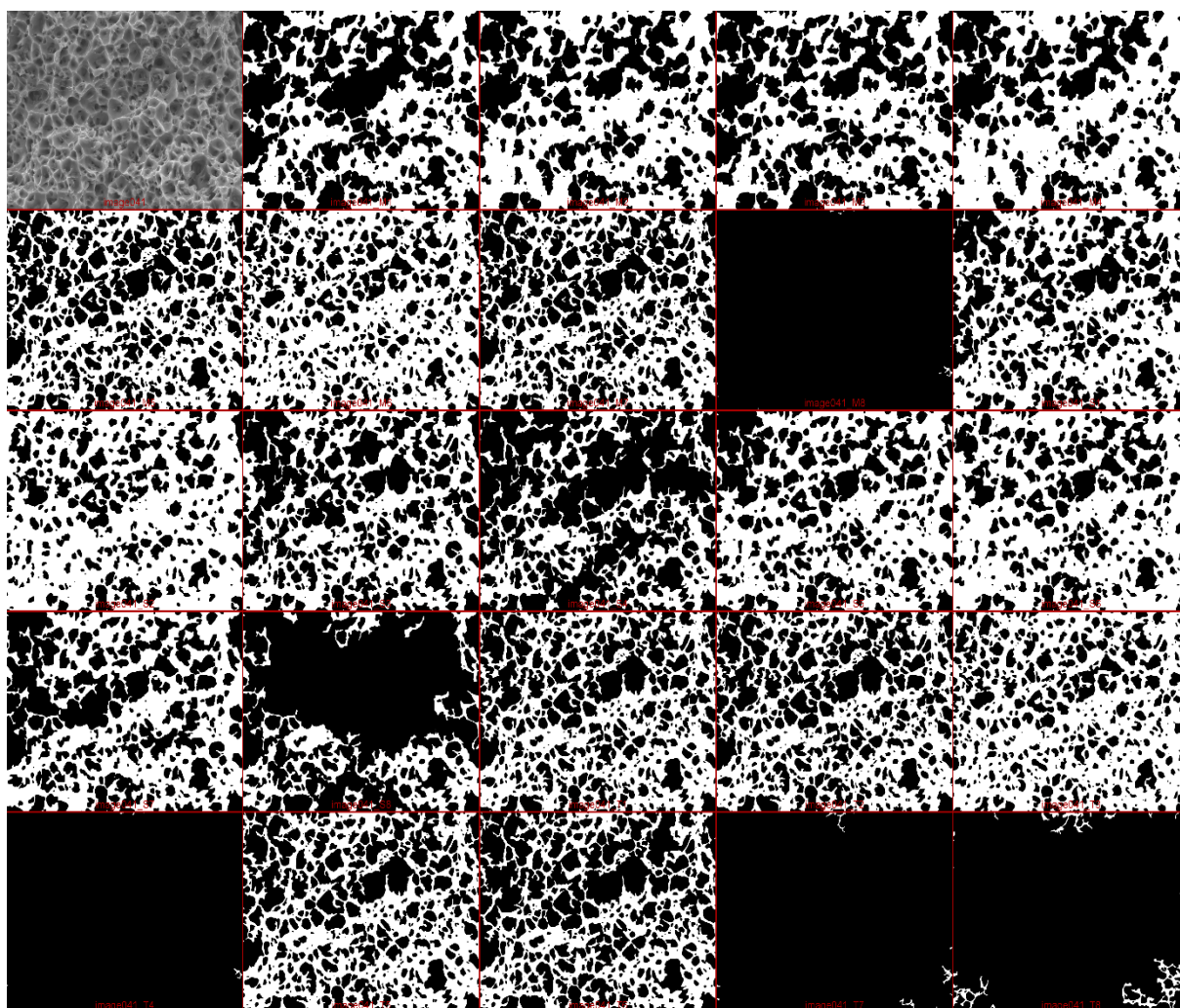


Figura 4.9: Imagem original (primeira imagem da esquerda para a direita de cima para baixo), seguida das imagens geradas após o ImageJ transformar a original em uma imagem de escala preto e branco

A Figura 4.10 e 4.11 apresentam as imagens utilizadas para as análises do 900MCM e do 1055 no ImageJ e suas respectivas imagens em preto e branco após a correção manual. Foi utilizado uma ampliação de 1200 vezes no MEV e as imagens escolhidas para análise são as do fio central do condutor.

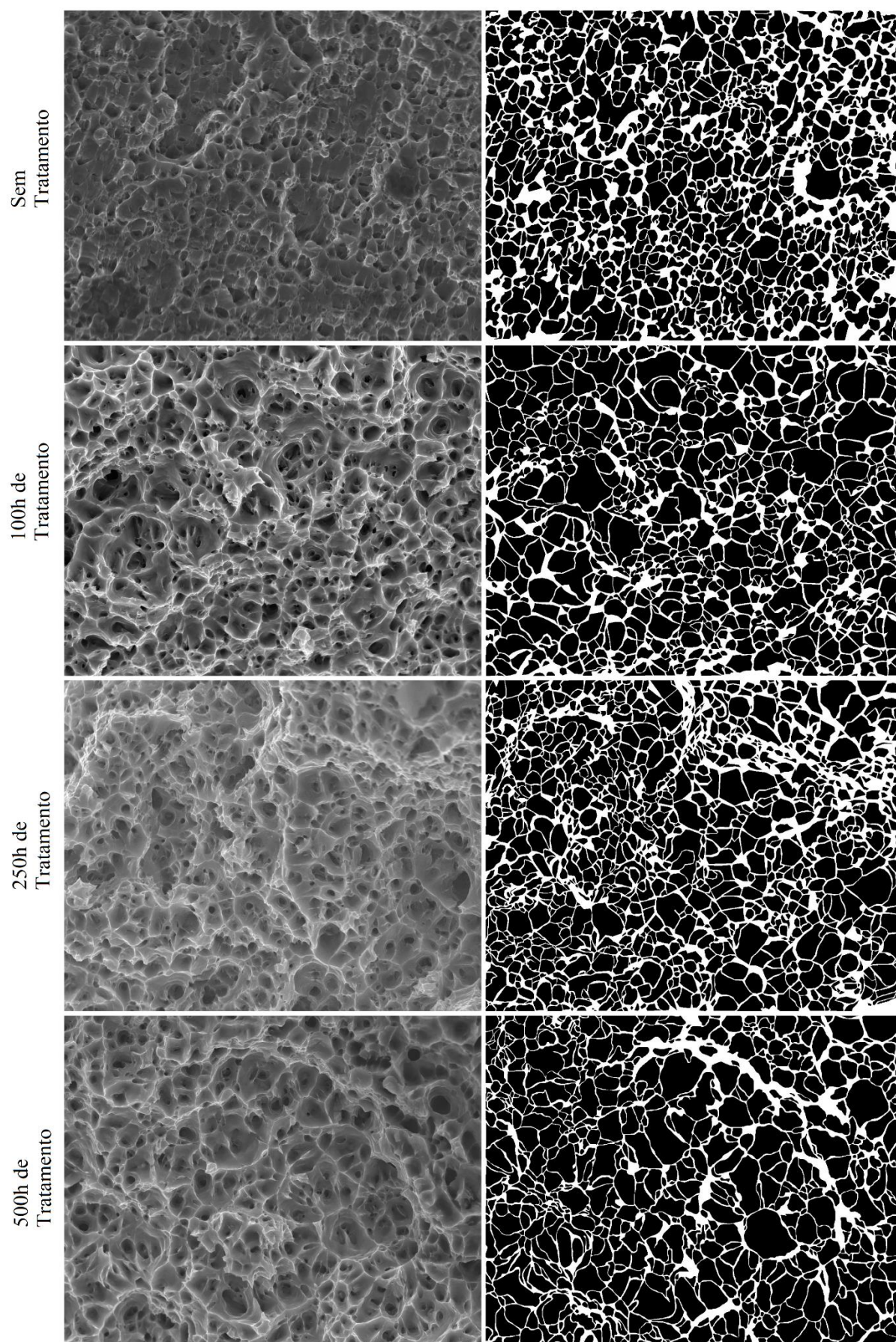


Figura 4.10: Imagens originais do CAL 900MCM (a esquerda) e modificadas pelo ImageJ (a direita).

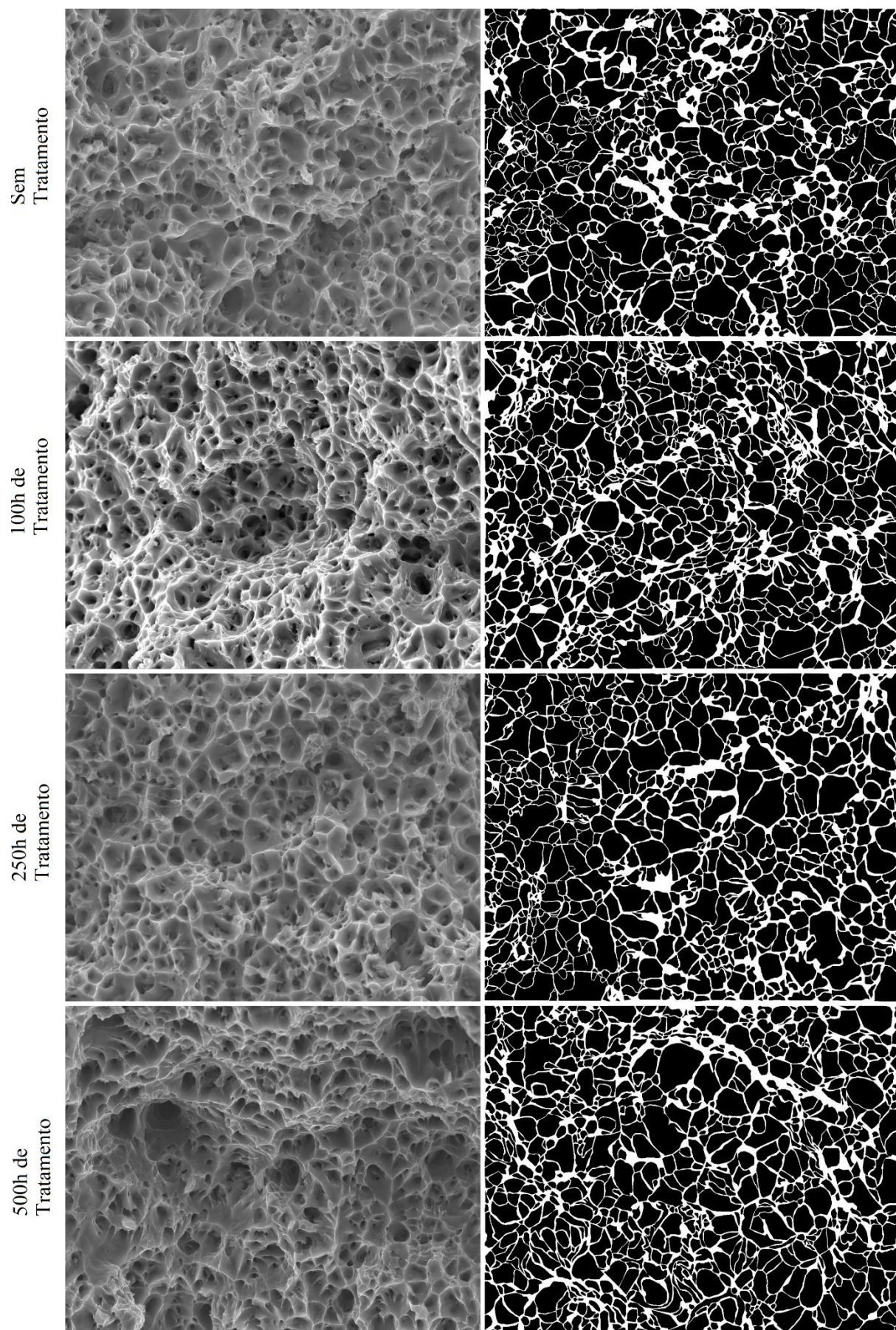


Figura 4.11: Imagens originais do CAL 900MCM (a esquerda) e modificadas pelo ImageJ (a direita).

Após a obtenção das imagens apresentadas nas Figuras 4.10 e 4.11, o ImageJ gerou planilhas com informações acerca do número total de *dimples* (manchas pretas), bem como suas áreas e diâmetros médios. Tais valores estão apresentados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5: Parâmetros medidos a partir do ImageJ

Cabo	Tratamento	Número Total de <i>Dimples</i>	Área Média (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)
900MCM	-	782	0,2045	0,2409
	100h	651	0,2630	0,3298
	250h	1001	0,1034	0,2003
	500h	638	0,2466	0,3855
1055	-	627	0,2868	0,3705
	100h	857	0,1940	0,1819
	250h	649	0,2611	0,4649
	500h	684	0,2417	0,2037

Como é possível observar na Tabela 4.5, os três parâmetros analisados nos *dimples* das falhas não apresentaram nenhum padrão aparente que indique que o tratamento térmico tenha afetado em sua formação.

Vasudévan (1986) observou que em ligas de Al-Mg-Si, o aumento da ductilidade do material associado a um estágio de superenvelhecimento (cerca de 8h a 200°C), da liga causava um aumento proporcional na quantidade de *dimples* presentes na falha, algo que segundo o mesmo autor se dava pelo fato dos microvazios se formarem sobre estruturas precipitadas incoerentes, estruturas essas que são características por se formarem durante um estágio inicial de superenvelhecimento. Caso realmente exista uma falta de padrão nos resultados analisados na Tabela 4.5, essas informações podem indicar que não há alteração na formação de precipitados incoerentes gerados pelo tratamento térmico das ligas, um fenômeno que poderia estar relacionado ao longo tempo de duração dos tratamentos térmicos, algo que pode gerar uma dissolução dos precipitados na matriz da liga, Porter (1992).

4.5 RESULTADOS DA METALOGRAFIA

Após o ataque químico realizado com hidróxido de sódio, Keller e ácido fluorídrico, as fases da liga 6201 foram evidenciadas. Na Figura 4.12 é feita uma comparação entre as 4 camadas de arames do condutor 900MCM que não foram submetidas a nenhum tratamento térmico, aumentadas em 500 vezes.

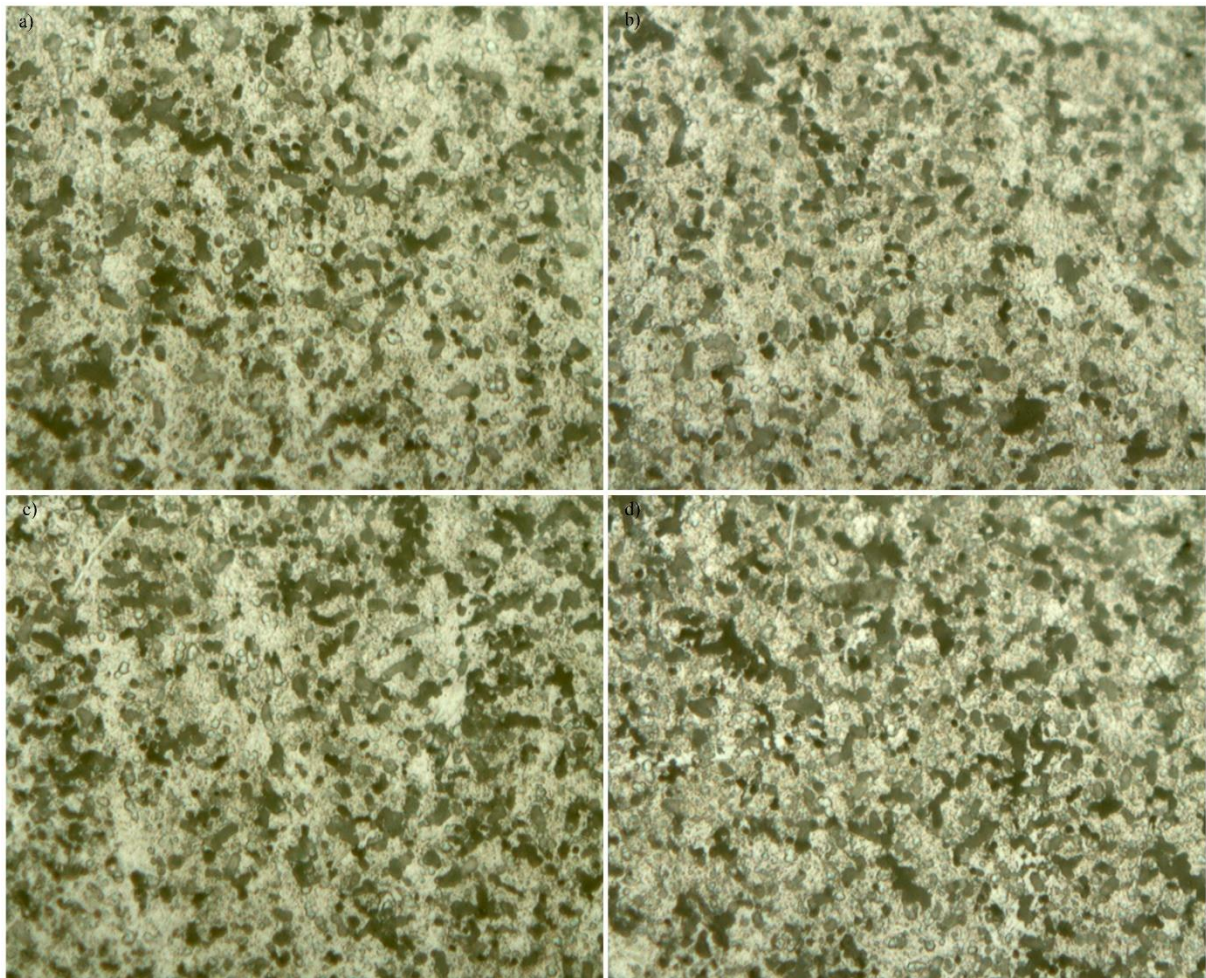


Figura 4.12: Imagens obtidas através de ampliação de 500 vezes do cabo 900MCM em um Microscópio Óptico. (a) Ampliação do fio central. (b) Ampliação da coroa 1. (c) Ampliação da coroa 2. (d) Ampliação da coroa 3

É possível observar na Figura 4.12 que não houve nenhuma alteração perceptível nas distribuições das fases da liga 6201 no condutor 900MCM. A Figura 4.13 faz uma comparação entre as 5 camadas de arames do condutor 1055 que também não passaram por nenhum tratamento térmico e foram ampliadas em 500 vezes. Comparando a Figura 4.12 com a Figura 4.13 é perceptível que existe um aumento nas fases evidenciadas em coloração mais escura nas camadas do condutor 1055. Uma possível explicação para esse efeito são diferenças nos processos de fabricação dos cabos, que não foram claramente expostos pela Nexans. Como apresentado por Callister (2000) diferenças nas proporções de elementos de liga adicionados a matriz principal acarretam em fases com características morfológicas distintas, dentre elas os tamanhos das fases passam a não serem mais os mesmos. Essa pode ser uma possível explicação para o que foi observado, porém estudos mais aprofundados, utilizando-se de outras técnicas, devem ser realizados para se investigar a fundo a diferença nos tamanhos dessas fases.

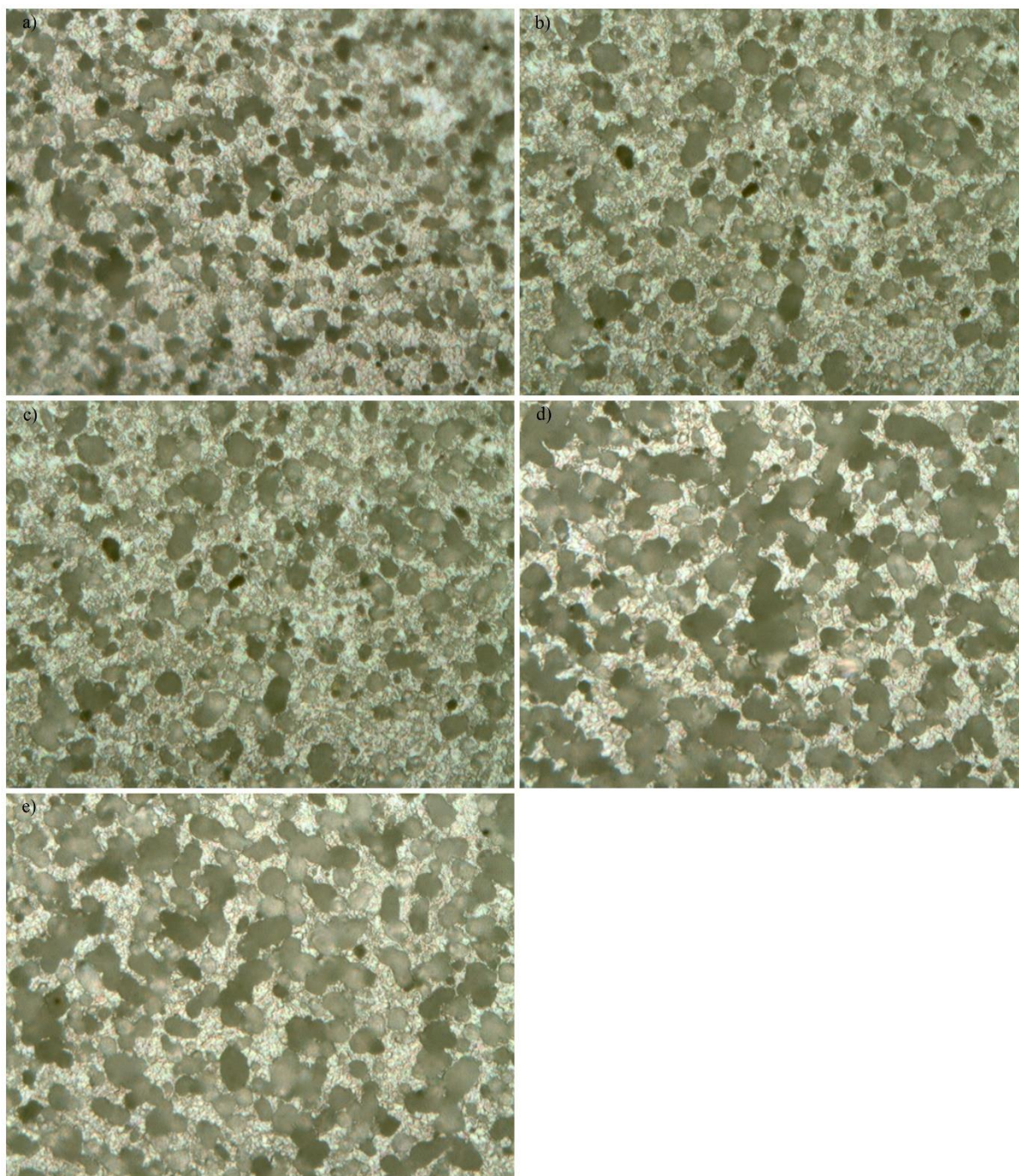


Figura 4.13: Imagens obtidas através de ampliação de 500 vezes do cabo 1055 em um Microscópio Óptico. (a) Ampliação do fio central. (b) Ampliação da coroa 1. (c) Ampliação da coroa 2. (d) Ampliação da coroa 3. (e) Ampliação da coroa 4

Na figura 4.14 são apresentadas imagens dos dois cabos lado a lado (900MCM a esquerda e 1055 a direita), quando submetidos a diferentes tratamentos térmicos, a ampliação utilizada foi de 500 vezes.

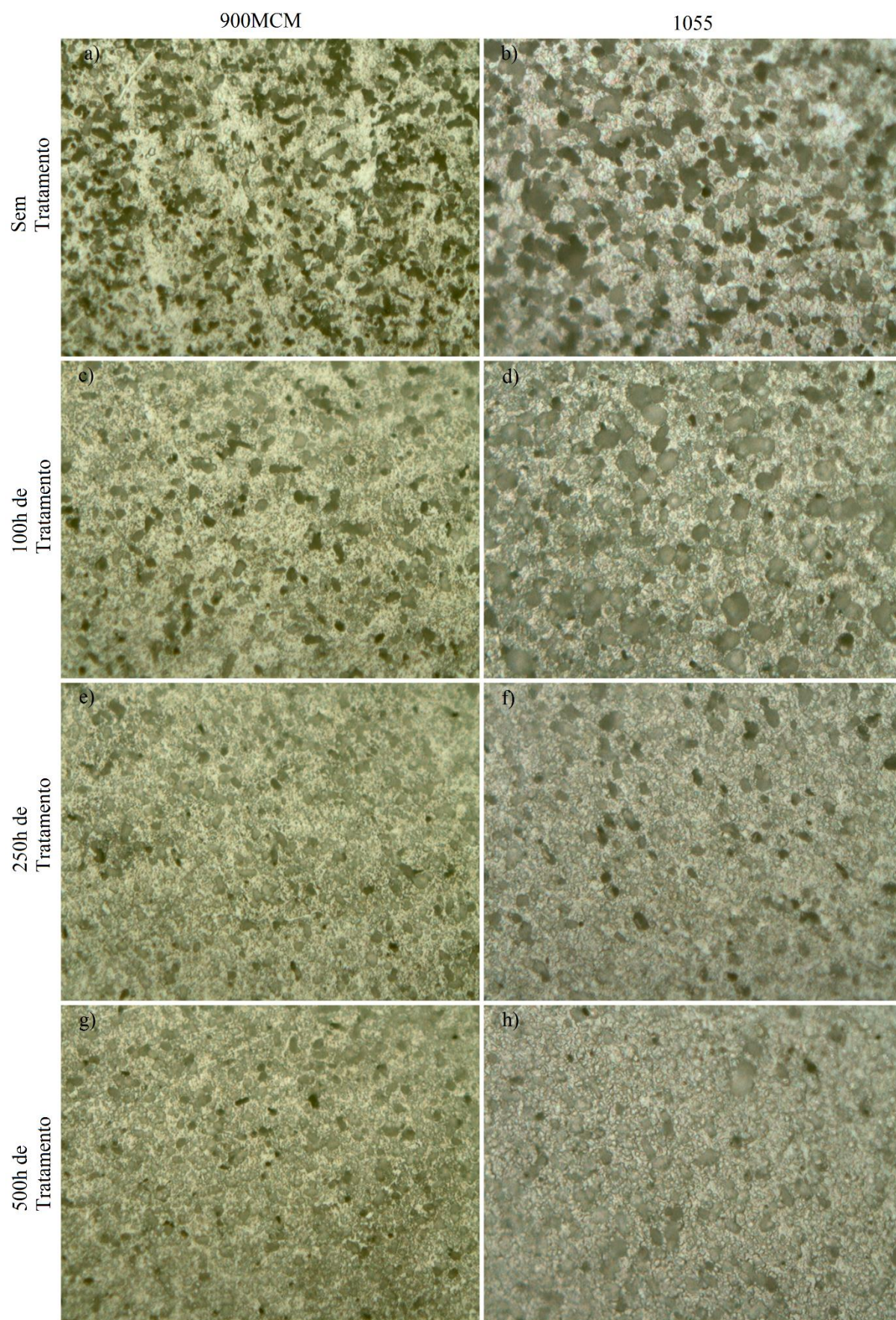


Figura 4.14: Comparação das fases antes e após cada tratamento térmico

Analisando a Figura 4.14, pode-se observar uma redução gradual das fases escuras à medida que os tratamentos térmicos se desenvolvem. Com o intuito de possibilitar uma melhor comparação, a Figura 4.15 apresenta, em ampliação de 1000 vezes, os dois condutores analisados sem tratamento e com tratamento térmico de 500h.

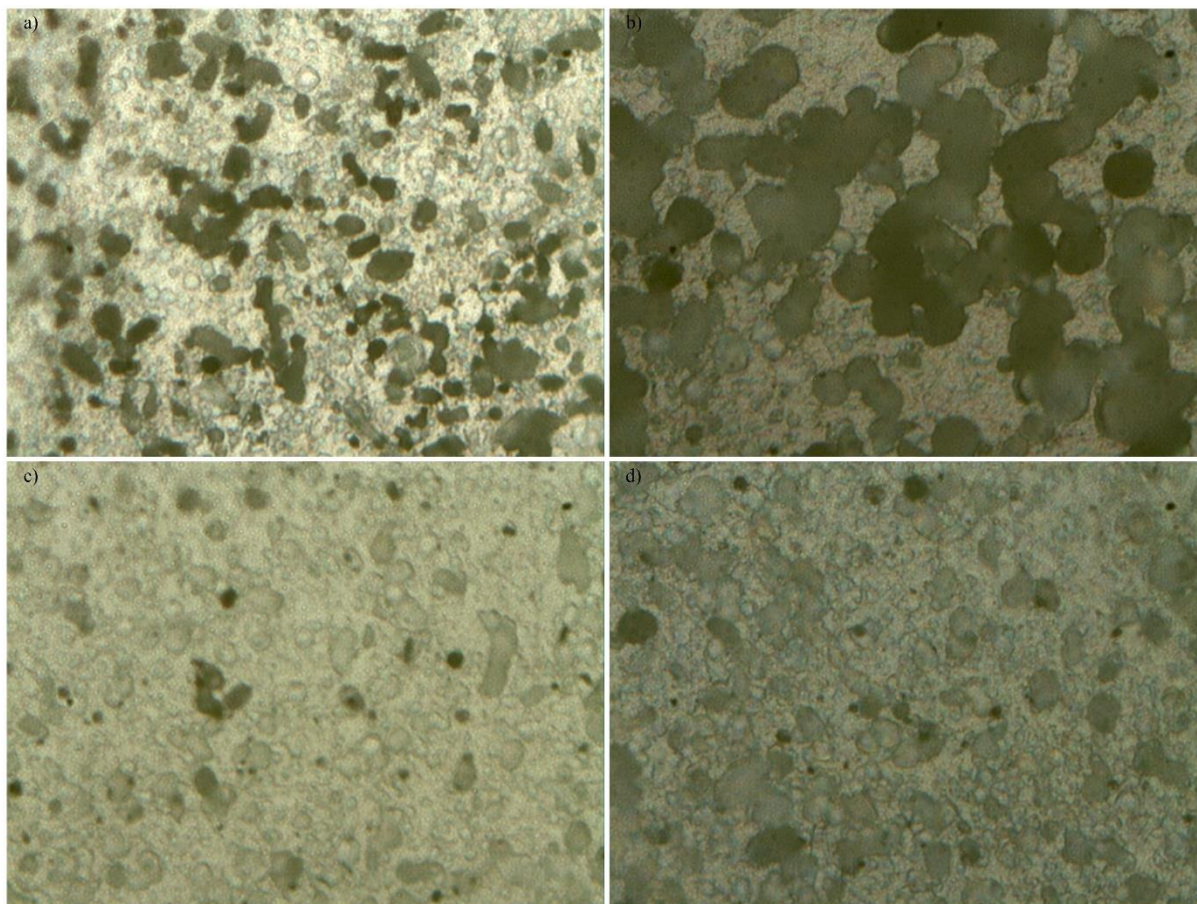


Figura 4.15: Imagens obtidas através de ampliação de 1000 vezes do cabo 900MCM (esquerda) e 1055 (direita), em um Microscópio Óptico. (a) 900MCM sem tratamento. (b) 1055 sem tratamento. (c) 900MCM com tratamento de 500h. (d) 1055 com tratamento de 500h

A Figura 4.15 evidencia a diminuição das fases escuras que aparentemente se difundiram na matriz acinzentada. Porter (1992) afirma que com o contínuo fornecimento de energia, elementos de liga tendem a difundir de regiões de maiores concentrações para regiões de menores concentrações, teoricamente esse movimento ocorre até que a completa homogeneização da liga seja alcançada, algo que na prática nunca ocorre devido as inúmeras falhas (vacâncias, impurezas, fronteiras de grãos), presentes na rede cristalina desses materiais. O fenômeno apresentado nas Figuras 4.14 e 4.15 aparenta ser o mesmo descrito por Porter (1992), uma vez que a diminuição na concentração das fases foi acompanhada de uma redução do limite de resistência à tração, apresentado na Seção 4.2. A homogeneização da liga afeta no limite de resistência da mesma uma vez que a diluição das fases facilita o deslocamento das discordâncias ao longo da rede cristalina. As discordâncias enfrentam menos resistência ao se deslocar em volta das fases do que através delas, logo, com a diminuição da densidade

dessas fases na matriz principal, tais discordâncias conseguem circular esses obstáculos com maior facilidade.

4.6 RESULTADOS DA ESPECTROSCOPIA DE ENERGIA DISPERSIVA

A Figura 4.16 apresenta duas imagens geradas com ampliação de 2000 vezes durante o ensaio de Espectroscopia de Energia Dispersiva, nessas imagens é possível observar três fases claramente distintas: uma fase preta, uma fase clara (branca) e uma matriz cinza. Quatro pontos distintos foram marcados em cada uma dessas três fases para que então a análise pudesse ser realizada.

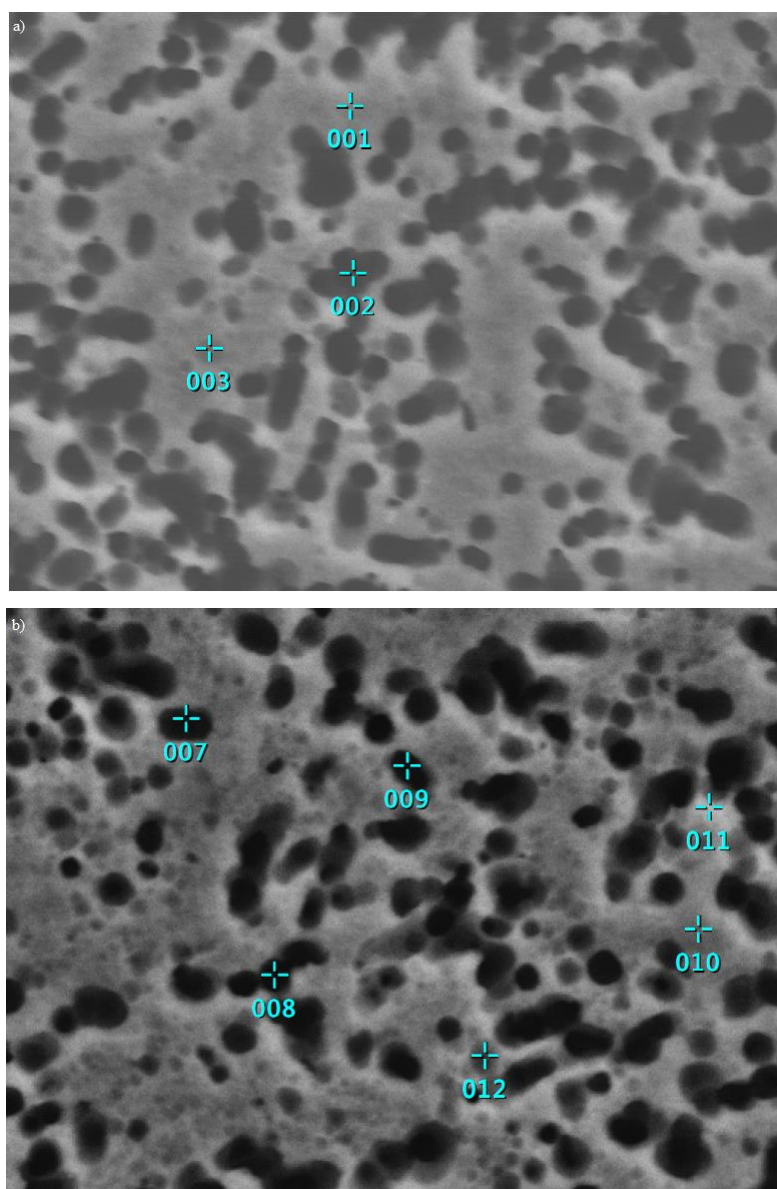


Figura 4.16: Pontos marcados em uma amostra de CAL 900MCM fio central como recebido, ampliação de 2000 vezes. (a) Pontos marcados de 1 a 3. (b) Pontos marcados de 7 a 12

A análise retorna valores em porcentagem de massa de cada elemento químico presente no ponto em análise. Tais valores são apresentados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6: Valores em porcentagem de massa de alumínio (Al), magnésio (Mg) e silício (Si) presente nos pontos analisados

	Fase Preta (%)				Fase Cinza (%)				Fase Branca (%)			
	2	7	8	9	1	3	10	12	4	5	6	11
Mg	0,65	0,71	0,72	0,78	0,32	0,28	0,2	0,64	0,5	0,57	0,47	0,66
Al	98,57	98,52	98,58	99,04	99,55	99,49	99,69	98,84	99,51	99,43	99,41	98,7
Si	0,78	0,77	0,71	0,18	0,13	0,23	0,11	0,51	0,09	0	0,12	0,65

Através da análise da Tabela 4.6 é possível observar que aparentemente existe uma tendência de as fases escuras serem as mais concentradas em magnésio e silício, enquanto a matriz cinza tende a ser menos concentrada. Já a fase branca aparenta possuir concentrações mais baixas de silício. Uma quantidade maior de pontos requer ser analisada para que se possa afirmar que realmente existe uma tendência de as concentrações apresentarem os comportamentos descritos acima.

Pela Tabela 4.6 também é possível observar que os pontos 11 e 12 apresentam uma certa discrepância dos demais de suas respectivas fases. O ponto 12 possui mais que o dobro de concentrações de magnésio e silício do que a média dos outros pontos, já o ponto 11 apresenta uma concentração de silício cerca de 9 vezes maior que a média dos demais pontos. Essa discrepância possivelmente ocorre por não existir apenas as 3 fases claramente evidenciadas pela análise Espectroscopia de Energia Dispersiva. É possível notar com mais nitidez nas imagens geradas durante a metalografia apresentadas na Seção 4.5 que existem mais que três tonalidades diferentes de cores que indicam a existência de mais do que três fases nessa liga. De fato, Banhart (2010) observa a formação de diversas fases em ligas Al-Mg-Si

A Figura 4.15 apresenta uma sequência teórica de formação de tal fases durante o processo de envelhecimento da liga, na qual se parte de uma solução sólida supersaturada (SSSS), para a formação de grupo de magnésio e silício que se ligam através de atração mútua. Com o tempo esses grupos começam a se atrair mutuamente, dando origem aos “*co-clusters*” e posteriormente aos semi-precipitados (GP(I)) que são aglomerados de átomos de magnésio e silício com tamanhos de 1 a 3nm. A fase β'' é a principal fase endurecedora, é formada por precipitados com o formato de agulhas. Outras fases metaestáveis (β' , B' , U1, U2, U3), podem se formar, não necessariamente nessa ordem, variando de composição de acordo com as concentrações de elementos de liga e com as temperaturas na qual o material está submetido. A última fase β representa uma fase estável que é formada apenas em altas temperaturas.

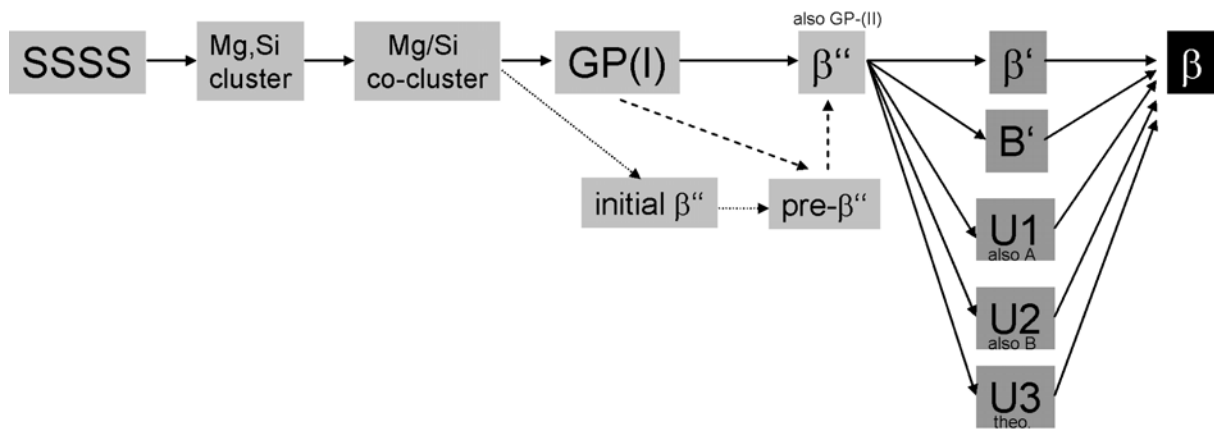


Figura 4.17: Sequência de formação teórica das fases de uma liga Al-Mg-Si. Fonte: Banhart (2010)

Na Figura 4.17 observa-se que não existe um único caminho ou sequência durante o processo de envelhecimento, cada concentração de elementos de liga e cada temperatura na qual a liga é submetida altera tal processo, podendo inclusive existir coexistência de diversas fases. A composição química também é alterada de liga para liga, tornando-se necessário a utilização de técnicas experimentais (como de um Microscópio Eletrônico de Transmissão), para se caracterizar cada uma das fases, Banhart (2010).

Banhart (2010) também afirma que a caracterização das fases pelo método da Espectroscopia de Energia Dispersiva pode se tornar difícil para ligas de Al-Mg-Si, uma vez que os principais elementos que compõe essa liga são vizinhos na tabela periódica, de tal forma que o raio X é difratado de forma semelhante por esses elementos, gerando imagens com baixo contraste, o que pode ser uma das explicações para a discrepância dos pontos 11 e 12 apresentados na Tabela 4.6.

Capítulo 5 Conclusão

5.1 CONCLUSÃO

Foi possível observar e quantificar a diminuição do limite de resistência à tração de dois cabos de alumínio liga 6201 (CAL 900MCM e CAL 1055), após submetidos a tratamentos térmicos que simulam ciclos de sobrecarga elétrica. Ficou evidente que tais tratamentos influenciaram diretamente na diminuição gradual do limite de resistência à tração dos cabos, que após 100, 250 e 500h em tratamento nos fornos mufla a temperatura de 140°C, apresentaram cerca de 20, 25 e 30% de redução no limite de resistência à tração.

Através de análises fractográficas foi possível observar que tanto as falhas que ocorreram nos cabos tratados quanto as nos cabos como recebidos, apresentaram característica dúcteis (formação de microcavidades e estricções). Por meio da medida das estricções apresentadas na região das falhas, aparenta-se haver uma relação direta entre tempo de tratamento térmico e aumento da ductilidade do material.

Não se observou alterações perceptíveis na formação dos *dimples* após os tratamentos térmicos, tal resultado pode sugerir que não houve uma alteração significativa na quantidade de precipitados incoerentes que se formaram na liga antes e após os tratamentos. A formação de precipitados incoerentes, segundo Vasudévan (1986), favorece o surgimento de *dimples*, uma vez que os microvazios que surgem durante uma fratura dúctil tendem a se formar sobre esse tipo de precipitado.

A metalografia evidenciou as fases que compõem a liga 6201, possibilitando a observação de uma redução gradual da concentração dessas fases na liga após os tratamentos térmicos. É possível que esse efeito seja um dos responsáveis pela diminuição do limite de resistência à tração do material, que pode ter ocorrido devido a diluição das fases da liga em sua matriz principal. A diminuição da concentração dessas fases facilita o deslocamento das discordâncias, algo que diminui o limite de resistência à tração do material, Porter (1992).

Referências Bibliográficas

- AGGARWAL R. K., JOHNS A.T., JAYASINGHE, J. A. S. B., SU, W. An overview of the condition monitoring of overhead lines. *Electric Power Systems Research* 53, 2000, p. 15-22.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. B 399/B 399M – 04. Standard Specification for concentric-lay-stranded aluminium alloy 6201-T81 conductors. United States, 2015.
- AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. ANSI H35.113: American national standard alloy and temper designation system for aluminium. United States, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5422: Projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica. Rio de Janeiro, 1985, p. 58.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5456: Eletricidade geral – terminologia. Brasil, 2010, p. 158.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5410: Instalações elétricas de baixa tensão. Rio de Janeiro, 2008, p. 209.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 280: Condutores de cabos isolados. Rio de Janeiro, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14039: Instalações elétricas de média tensão de 1,0kV a 36,2kV. Rio de Janeiro, 2005, p. 87.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7549: Alumínio e suas ligas – produtos laminados, extrudados e fundidos – ensaio de tração. Rio de Janeiro, 2008, p. 54.
- AZEVEDO, C. R. F., CESCONE, T. Failure analysis of aluminium cable steel reinforced (ACSR) conductor of the transmission line crossing the Paraná River. *Engineering Failure Analysis* 9, 2002, p. 645-664.
- BENEDYK, J. C., International temper designation systems for wrought aluminium alloys: part I – thermally treated (T temper) aluminium alloys. *Light Metal Age*, august, 2010.
- BENEDYK, J. C., International temper designation systems for wrought aluminium alloys: part II – thermally treated (T temper) aluminium alloys. *Light Metal Age*, august, 2010.
- CALLISTER, William D. Jr. *Ciência e engenharia de materiais: uma introdução*. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2000.
- DENSLEY, J. Ageing mechanisms and diagnostics for power cables – an overview. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 2001, Vol. 17, No 1.

DEVORE, Jay L. Probabilidade e estatística: para engenharia e ciências. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2006.

ELETRONORTE. Corrente Contínua – revista da Eletronorte. Ano XXXII, nº229, novembro/dezembro, 2009, p. 31.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Balanço energético nacional 2008: ano base 2007 / Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro: EPE, 2008, p. 244.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. Objetivos de desenvolvimento do milênio: relatório nacional de acompanhamento. Coordenação: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada e Secretaria de Planejamento e Investimentos Estratégicos; supervisão: Grupo Técnico para o acompanhamento dos ODM. Brasília : Ipea : MP, SPI, 2014.

KARABAY, S., FEYZULLAHOGLU, E. Determination of early failure sources and mechanisms for Al99.7% and Al-Mg-Si alloy bare conductors used in aerial transmission lines. Engineering Failure Analysis 38, 2014, p. 1-15.

KARABAY, S. Influence of AlB₂ compound on elimination of incoherent precipitation in artificial aging of wires drawn from redraw rod extruded from billets cast of alloy AA-6101 by vertical direct chill casting. Materials and Design 29, 2007, p. 1 – 12.

LABEGALINI, P. R., LABEGALINI, J. A., FUCHS, R. D., ALMEIDA, M. T. Projeto Mecânico das Linhas de Transmissão. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher LTDA, 1992. 528 p.

LIU, Y. L., KANG, S. B., KIM, H. W. The complex microstructures in an as-cast Al-Mg-Si alloy. Materials Letters 41, 2009, p. 267 – 272.

NEXANS S.A. Energia Cabos aéreos nus. Disponível em: <<http://nexans.com.br>>. Acesso em: 01/06/2016. Catálogo comercial, 2016, p.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ENERGÉTICO. Relatório geral de geração e distribuição. Brasil: ONS, 2009, p. 89.

PORTER, D. A.; EASTERLING, K. E. Phase Transformations in Metals and Alloys. 2ª Edição. ed. [S.l.]: Chapman Hall, 1992.

SHIGLEY, J. E., MISCHEKE, C. R., BUDYNAS, R. G. Projeto de Engenharia Mecânica. 7. ed. Tradução João Batista de Aguiar, José Manuel de Aguiar. Porto Alegre: Bookman, 2005. 960 p.

THE ALUMINIUM ASSOCIATION. Aluminum electrical conductor handbook. 3. ed. Washington D. C.: Aluminium Association, 1989. p. 365.

VASUDEVAN, A. K., DOHERTY, R. D. Grain boundary ductile fracture in precipitation hardened aluminium alloys. Acta Metall 58, 1987. P. 1193 – 1219.

Apêndice A – Cronograma de atividade dos fornos

Tabela A: Cronograma de atividades dos fornos durante os tratamentos térmicos

Data	Horário	Marco	Observação
28/07/2016	09:00h	Início dos tratamentos	O forno foi ligado para 100h.
01/08/2016	13:00h	Fim do 1º ciclo de 100h	Constatou-se que houveram quedas de energia na UnB e que os fornos desligaram em algum momento na madrugada do primeiro dia, invalidando os tratamentos. Todas as amostras foram descartadas.
04/08/2016	09:00h	Início dos novos tratamentos	O forno foi ligado para 100h.
08/08/2016	13:00h	Fim do 1º ciclo de 100h	O primeiro par de cabos foi retirado e o forno foi religado para mais 100h.
12/08/2016	17:00h	Fim do 2º Ciclo de 100h	O forno foi religado e programado para mais 50h.
14/08/2016	19:00h	Fim do ciclo de 250h	Não foi possível religar o forno por ser domingo e o SG9 estar fechado.
15/08/2016	08:00h	-	O segundo par de cabos foi retirado e o forno foi religado e programado para 50h.
17/08/2016	10:00h	Fim do 3º ciclo de 100h	O forno foi religado e programado para mais 100h.
21/08/2016	14:00h	Fim do 4º ciclo de 100h	Não foi possível religar o forno por ser domingo e o SG9 estar fechado.

22/08/2016	08:00h	Início do último ciclo de 100h	O forno foi religado e programado para mais 100h.
26/08/2016	12:00h	Fim do último ciclo de 100h	O último par de cabos foi removido.

Apêndice B – Tabelas

B.1 DIÂMETROS DOS ARAMES QUE COMPÕEM OS CORPOS DE PROVA DO CAL 900MCM COMO RECEBIDO

Tabela B.1: Diâmetro dos arames do CAL 900 Como Recebido

Posição	Corpo de Prova	Diâmetro Medidos $\pm 0,0025$ (mm)									Média	Desvio Padrão
		1	2	3	4	5	6	7	8	9		
Fio central	CP 1	3,90	3,90	3,95	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,91	0,02
	CP 2	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,95	3,91	0,02
	CP 3	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	0,00
	CP 4	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,95	3,90	3,91	0,02
	CP 5	3,90	3,90	3,90	3,95	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,91	0,02
Coroa 1	CP 1	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	4,00	3,90	3,90	3,91	0,03
	CP 2	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	0,00
	CP 3	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,95	3,90	3,90	3,90	3,91	0,02
	CP 4	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	0,00
	CP 5	3,95	3,90	3,90	3,90	3,95	3,90	3,90	3,90	3,90	3,91	0,02
Coroa 2	CP 1	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,95	3,90	3,90	3,90	3,91	0,02
	CP 2	3,90	3,90	3,95	4,00	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,92	0,04
	CP 3	4,00	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,95	3,90	3,92	0,04
	CP 4	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	0,00
	CP 5	3,95	3,95	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,91	0,02
Coroa 3	CP 1	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	0,00
	CP 2	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	0,00
	CP 3	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	0,00

	CP 4	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	0,00
	CP 5	3,90	4,00	3,90	3,95	3,90	3,90	3,90	3,90	4,00	3,93	0,04

B.2 DIÂMETROS DOS ARAMES QUE COMPÕEM OS CORPOS DE PROVA DO CAL 900MCM TRATADO 100H

Tabela B.2: Diâmetro dos arames do CAL 900 com Tratamento de 100h

Posição	Corpo de Prova	Diâmetro Medidos $\pm 0,0025$ (mm)									Média	Desvio Padrão
		1	2	3	4	5	6	7	8	9		
Fio central	CP 1	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	0,00
	CP 2	3,95	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,91	0,02
	CP 3	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	0,00
	CP 4	3,95	3,90	3,95	3,90	3,90	3,90	3,90	3,95	3,90	3,92	0,03
	CP 5	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	0,00
Coroa 1	CP 1	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	0,00
	CP 2	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	0,00
	CP 3	3,90	3,90	3,95	3,90	3,95	3,90	3,90	3,95	3,90	3,92	0,03
	CP 4	3,95	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,91	0,02
	CP 5	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	0,00
Coroa 2	CP 1	3,95	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,95	3,95	3,90	3,92	0,03
	CP 2	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	0,00
	CP 3	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	4,00	3,91	0,03
	CP 4	3,95	3,90	3,90	3,90	3,90	3,95	3,90	3,90	3,90	3,91	0,02
	CP 5	3,95	3,90	3,95	3,90	3,90	4,00	3,90	3,90	3,90	3,92	0,04
	CP 1	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	0,00
	CP 2	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,95	3,91	0,02

Coroa 3	CP 3	3,95	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	4,00	3,90	3,92	0,04
	CP 4	3,90	3,90	3,90	3,95	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,91	0,02
	CP 5	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,95	3,90	3,90	3,91	0,02

B.3 DIÂMETROS DOS ARAMES QUE COMPÕEM OS CORPOS DE PROVA DO CAL 900MCM TRATADO 250H

Tabela B.3: Diâmetro dos arames do CAL 900 com Tratamento de 250h

Posição	Corpo de Prova	Diâmetro Medidos $\pm 0,0025$ (mm)									Média	Desvio Padrão
		1	2	3	4	5	6	7	8	9		
Fio central	CP 1	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	0,00
	CP 2	3,95	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,91	0,02
	CP 3	3,90	3,90	3,95	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,95	3,91	0,02
	CP 4	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	0,00
	CP 5	3,90	3,90	3,90	3,90	3,95	3,95	3,90	3,90	3,90	3,91	0,02
Coroa 1	CP 1	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	0,00
	CP 2	3,95	3,95	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,91	0,02
	CP 3	3,90	3,90	3,95	3,90	4,00	3,90	3,95	3,90	3,95	3,93	0,04
	CP 4	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	0,00
	CP 5	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	0,00
Coroa 2	CP 1	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	0,00
	CP 2	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,95	3,90	3,91	0,02
	CP 3	3,90	3,95	3,90	3,95	3,90	3,90	3,90	3,95	3,90	3,92	0,03
	CP 4	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	0,00
	CP 5	3,90	3,90	3,95	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,91	0,02
	CP 1	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	0,00

Coroa 3	CP 2	3,90	3,95	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,91	0,02
	CP 3	3,90	3,90	3,90	3,90	3,95	3,90	3,90	3,90	3,90	3,91	0,02
	CP 4	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	0,00
	CP 5	3,95	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	4,00	3,90	3,90	3,92	0,04

B.4 DIÂMETROS DOS ARAMES QUE COMPÕEM OS CORPOS DE PROVA DO CAL 900MCM TRATADO 500H

Tabela B.4: Diâmetro dos arames do CAL 900 com Tratamento de 500h

Posição	Corpo de Prova	Diâmetro Medidos $\pm 0,0025$ (mm)									Média	Desvio Padrão
		1	2	3	4	5	6	7	8	9		
Fio central	CP 1	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	0,00
	CP 2	3,90	3,95	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,95	3,91	0,02
	CP 3	3,95	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,95	3,90	3,91	0,02
	CP 4	3,90	3,90	3,95	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,91	0,02
	CP 5	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	0,00
Coroa 1	CP 1	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	0,00
	CP 2	3,90	3,90	3,90	3,95	3,90	3,90	3,90	3,90	3,95	3,91	0,02
	CP 3	3,90	3,95	3,90	3,90	3,95	3,90	3,90	3,90	3,95	3,92	0,03
	CP 4	3,90	3,90	3,95	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,91	0,02
	CP 5	3,90	3,95	3,90	3,90	3,90	3,90	4,00	3,90	3,90	3,92	0,04
Coroa 2	CP 1	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,95	3,90	3,90	3,90	3,91	0,02
	CP 2	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	0,00
	CP 3	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	0,00
	CP 4	3,95	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,91	0,02
	CP 5	3,95	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,95	3,90	3,91	0,02

Coroa 3	CP 1	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	0,00
	CP 2	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	0,00
	CP 3	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	0,00
	CP 4	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	0,00
	CP 5	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	0,00

B.5 DIÂMETROS DOS ARAMES QUE COMPÕEM OS CORPOS DE PROVA DO CAL 1055 COMO RECEBIDO

Tabela B.5: Diâmetro dos arames do CAL 1055 como recebido

Posição	Corpo de Prova	Diâmetro Medidos $\pm 0,0025$ (mm)									Média	Desvio Padrão
		1	2	3	4	5	6	7	8	9		
Fio central	CP 1	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	0,00
	CP 2	3,35	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,31	0,02
	CP 3	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	0,00
	CP 4	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,35	3,31	0,02
	CP 5	3,35	3,30	3,30	3,35	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,31	0,02
Coroa 1	CP 1	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	0,00
	CP 2	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	0,00
	CP 3	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	0,00
	CP 4	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	0,00
	CP 5	3,30	3,30	3,35	3,30	3,30	3,30	3,30	3,35	3,30	3,31	0,02
Coroa 2	CP 1	3,30	3,30	3,30	3,30	3,35	3,30	3,30	3,30	3,30	3,31	0,02
	CP 2	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	0,00
	CP 3	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	0,00
	CP 4	3,35	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,35	3,30	3,31	0,02

	CP 5	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	0,00
Coroa 3	CP 1	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	0,00
	CP 2	3,30	3,35	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,31	0,02
	CP 3	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	0,00
	CP 4	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	0,00
	CP 5	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,35	3,30	3,31	0,02
Coroa 4	CP 1	3,35	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,31	0,02
	CP 2	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,35	3,30	3,30	3,30	3,31	0,02
	CP 3	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	0,00
	CP 4	3,30	3,35	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,35	3,31	0,02
	CP 5	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	0,00

B.6 DIÂMETROS DOS ARAMES QUE COMPÕEM OS CORPOS DE PROVA DO CAL 1055 TRATADO 100H

Tabela B.6: Diâmetro dos arames do CAL 1055 com tratamento de 100h

Posição	Corpo de Prova	Diâmetro Medidos $\pm 0,0025$ (mm)									Média	Desvio Padrão
		1	2	3	4	5	6	7	8	9		
Fio central	CP 1	3,35	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,31	0,02
	CP 2	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	0,00
	CP 3	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	0,00
	CP 4	3,30	3,30	3,30	3,35	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,31	0,02
	CP 5	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	0,00
Coroa 1	CP 1	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	0,00
	CP 2	3,35	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,31	0,02
	CP 3	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,35	3,30	3,30	3,31	0,02

	CP 4	3,30	3,35	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,31	0,02
	CP 5	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	0,00
Coroa 2	CP 1	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	0,00
	CP 2	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	0,00
	CP 3	3,30	3,30	3,30	3,30	3,35	3,30	3,30	3,30	3,30	3,31	0,02
	CP 4	3,35	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,31	0,02
	CP 5	3,30	3,30	3,30	3,35	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,31	0,02
Coroa 3	CP 1	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	0,00
	CP 2	3,35	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,35	3,31	0,02
	CP 3	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	0,00
	CP 4	3,30	3,35	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,31	0,02
	CP 5	3,30	3,30	3,35	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,31	0,02
Coroa 4	CP 1	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	0,00
	CP 2	3,30	3,30	3,30	3,35	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,31	0,02
	CP 3	3,35	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,31	0,02
	CP 4	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	0,00
	CP 5	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,35	3,31	0,02

B.7 DIÂMETROS DOS ARAMES QUE COMPÕEM OS CORPOS DE PROVA DO CAL 1055 TRATADO 250H

Tabela B.7: Diâmetro dos arames do CAL 1055 com tratamento de 250h

Posição	Corpo de Prova	Diâmetro Medidos $\pm 0,0025$ (mm)									Média	Desvio Padrão
		1	2	3	4	5	6	7	8	9		
	CP 1	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	0,00

Fio central	CP 2	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	0,00
	CP 3	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	0,00
	CP 4	3,35	3,30	3,30	3,30	3,30	3,35	3,30	3,30	3,30	3,31	0,02
	CP 5	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	0,00
Coroa 1	CP 1	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	0,00
	CP 2	3,30	3,30	3,30	3,30	3,35	3,30	3,30	3,30	3,30	3,31	0,02
	CP 3	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	0,00
	CP 4	3,30	3,30	3,35	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,31	0,02
	CP 5	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,35	3,30	3,30	3,30	3,31	0,02
Coroa 2	CP 1	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	0,00
	CP 2	3,35	3,35	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,31	0,02
	CP 3	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	0,00
	CP 4	3,30	3,30	3,30	3,35	3,30	3,35	3,30	3,30	3,30	3,31	0,02
	CP 5	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	0,00
Coroa 3	CP 1	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,35	3,31	0,02
	CP 2	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	0,00
	CP 3	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	0,00
	CP 4	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,35	3,31	0,02
	CP 5	3,30	3,30	3,30	3,30	3,35	3,30	3,30	3,30	3,30	3,31	0,02
Coroa 4	CP 1	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	0,00
	CP 2	3,30	3,30	3,35	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,31	0,02
	CP 3	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,35	3,30	3,30	3,30	3,31	0,02
	CP 4	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,35	3,30	3,31	0,02
	CP 5	3,35	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,31	0,02

B.8 DIÂMETROS DOS ARAMES QUE COMPÕEM OS CORPOS DE PROVA DO CAL 1055 TRATADO 500H

Tabela B.8: Diâmetro dos arames do CAL 1055 com Tratamento de 500h

Posição	Corpo de Prova	Diâmetro Medidos $\pm 0,0025$ (mm)									Média	Desvio Padrão
		1	2	3	4	5	6	7	8	9		
Fio central	CP 1	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	0,00
	CP 2	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	0,00
	CP 3	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	0,00
	CP 4	3,35	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,35	3,30	3,30	3,31	0,02
	CP 5	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	0,00
Coroa 1	CP 1	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,35	3,30	3,30	3,30	3,31	0,02
	CP 2	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	0,00
	CP 3	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	0,00
	CP 4	3,30	3,30	3,30	3,30	3,35	3,30	3,30	3,30	3,30	3,31	0,02
	CP 5	3,30	3,35	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,31	0,02
Coroa 2	CP 1	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	0,00
	CP 2	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	0,00
	CP 3	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	0,00
	CP 4	3,30	3,30	3,35	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,31	0,02
	CP 5	3,35	3,30	3,30	3,30	3,35	3,30	3,30	3,30	3,30	3,31	0,02
Coroa 3	CP 1	3,30	3,35	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,35	3,31	0,02
	CP 2	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	0,00
	CP 3	3,30	3,30	3,30	3,35	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,31	0,02
	CP 4	3,35	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,35	3,31	0,02

	CP 5	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	0,00
Coroa 4	CP 1	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,35	3,30	3,30	3,31	0,02
	CP 2	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	0,00
	CP 3	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	0,00
	CP 4	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	0,00
	CP 5	3,35	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,35	3,31	0,02

B.9 CARGA MÁXIMA SUPORTADA NOS ENSAIOS DE TRAÇÃO DO CAL 900MCM

Tabela B.9.1: Cargas máximas suportadas pelos corpos de prova do CAL 900MCM como recebido

Corpo de Prova	Fio Central (N)	Corpo de Prova	Coroa 1 (N)	Corpo de Prova	Coroa 2 (N)	Corpo de Prova	Coroa 3 (N)
CP 1	3762	CP 1	3916	CP 1	3891	CP 1	3795
CP 2	3762	FALHA	-	CP 2	3936	CP 2	3817
CP 3	3764	CP 2	3964	CP 3	3892	CP 3	3793
FALHA	-	CP 3	4071	CP 4	3890	CP 4	3835
CP 4	3750	CP 4	3961	CP 5	3928	CP 5	3795
CP 5	3746	CP 5	4101	-	-	-	-
Média	3757,56		4003,41		3908,19		3807,77
Desvio Padrão	8,20		79,20		22,65		18,50

Tabela B.9.2: Cargas máximas suportadas pelos corpos de prova do CAL 900MCM com 100h de Tratamento

Corpo de Prova	Fio Central (N)	Corpo de Prova	Coroa 1 (N)	Corpo de Prova	Coroa 2 (N)	Corpo de Prova	Coroa 3 (N)
CP 1	3066	CP 1	3169	CP 1	3101	CP 1	3103
CP 2	3077	CP 2	3133	CP 2	3085	CP 2	3095
FALHA	-	CP 3	3142	CP 3	3105	FALHA	-
CP 3	3069	CP 4	3186	CP 4	3107	CP 3	3011
CP4	3064	CP 5	3177	CP 5	3107	CP 4	3099
CP5	3060	-	-	-	-	CP 5	3108
Média	3067,20		3161,40		3101,00		3083,20
Desvio Padrão	6,38		22,85		9,27		40,65

Tabela B.9.3: Cargas máximas suportadas pelos corpos de prova do CAL 900MCM com 250h de tratamento

Corpo de Prova	Fio Central (N)	Corpo de Prova	Coroa 1 (N)	Corpo de Prova	Coroa 2 (N)	Corpo de Prova	Coroa 3 (N)
CP 1	2867	CP 1	2924	CP 1	2836	CP 1	2872

CP 2	2859	CP 2	2877	CP 2	2863	CP 2	2861
CP 3	2854	CP 3	2849	CP 3	2833	CP 3	2847
FALHA	-	CP 4	2880	CP 4	2878	FALHA	-
CP 4	2850	CP 5	2829	CP 5	2868	CP 1	2847
FALHA	-	-	-	-	-	CP 2	2883
CP 5	2855	-	-	-	-	-	-
Média	2857,00	2871,80		2855,60		2862,00	
Desvio Padrão	6,44	35,95		20,03		15,75	

Tabela B.9.4: Cargas máximas suportadas pelos corpos de prova do CAL 900MCM com 500h de tratamento

Corpo de Prova	Fio Central (N)	Corpo de Prova	Coroa 1 (N)	Corpo de Prova	Coroa 2 (N)	Corpo de Prova	Coroa 3 (N)
CP 1	2714	CP 1	2740	CP 1	2736	CP 1	2713
CP 2	2709	CP 2	2742	CP 2	2744	CP 2	2724
CP 3	2722	CP 3	2739	CP 3	2733	CP 3	2723
CP 4	2706	CP 4	2757	CP 4	2743	CP 4	2712
CP 5	2707	CP 5	2734	FALHA	-	CP 5	2714
-	-	-	-	CP 5	2732	-	-
Média	2711,60	2742,40		2737,60		2717,20	
Desvio Padrão	6,58	8,68		5,59		5,81	

B.10 CARGA MÁXIMA SUPORTADA NOS ENSAIOS DE TRAÇÃO DO CAL 1055

Tabela B.10.1: Cargas máximas suportadas pelos corpos de prova do CAL 1055 como recebido

Corpo de Prova	Fio Central (N)	Corpo de Prova	Coroa 1 (N)	Corpo de Prova	Coroa 2 (N)	Corpo de Prova	Coroa 3 (N)	Corpo de Prova	Coroa 4 (N)
CP 1	2800	CP 1	2771	CP 1	2747	CP 1	2790	CP 1	2724
CP 2	2783	CP 2	2774	CP 2	2730	CP 2	2775	CP 2	2731
FALHA	-	CP 3	2780	FALHA	-	CP 3	2790	FALHA	-
FALHA	-	CP 4	2752	CP 3	2751	CP 4	2774	CP 3	2761
CP 3	2794	FALHA		FALHA		FALHA	-	CP 4	2728
CP 4	2783	CP 5	2770	CP 4	2752	CP 5	2779	CP 5	2728

CP 5	2790	-	-	CP 5	2752	-	-	-	-
Média	2790,00	2769,40		2746,40		2781,58		2734,40	
Desvio Padrão	7,31	10,48		9,40		7,77		15,08	

Tabela B.10.2: Cargas máximas suportadas pelos corpos de prova do CAL 1055 com 100h de tratamento

Corpo de Prova	Fio Central (N)	Corpo de Prova	Coroa 1 (N)	Corpo de Prova	Coroa 2 (N)	Corpo de Prova	Coroa 3 (N)	Corpo de Prova	Coroa 4 (N)
CP 1	2236	FALHA	-	CP 1	2228	CP 4	2231	CP 1	2271
CP 2	2249	CP 1	2220	FALHA		CP 5	2226	CP 2	2253
FALHA	-	CP 2	2220	FALHA	-	FALHA	-	CP 3	2258
CP 3	2255	CP 3	2231	CP 2	2202	CP 3	2258	CP 4	2255
CP 4	2239	CP 4	2224	CP 3	2209	CP 4	2229	CP 5	2263
CP 5	2241	FALHA	-	FALHA		CP 5	2237	-	-
-	-	CP 5	2237	CP 4	2209	-	-	-	-
-	-	-	-	CP 5	2216	-	-	-	-
Média	2244,00	2226,40		2212,80		2236,20		2260,00	
Desvio Padrão	7,81	7,44		9,83		12,83		7,21	

Tabela B.10.3: Cargas máximas suportadas pelos corpos de prova do CAL 1055 com 250h de tratamento

Corpo de Prova	Fio Central (N)	Corpo de Prova	Coroa 1 (N)	Corpo de Prova	Coroa 2 (N)	Corpo de Prova	Coroa 3 (N)	Corpo de Prova	Coroa 4 (N)
FALHA	-	CP 1	2080	FALHA	-	CP 1	2087	FALHA	-
CP 1	2106	CP 2	2058	CP 1	2102	CP 2	2100	CP 1	2077
CP 2	2073	CP 3	2051	CP 2	2070	CP 3	2064	CP 2	2053
CP 3	2088	CP 4	2093	FALHA	-	FALHA	-	CP 3	2068
CP 4	2066	CP 5	2068	CP 3	2049	CP 4	2064	CP 4	2093
CP 5	2064	-	-	CP 4	2071	CP 5	2056	CP 5	2061
-	-	-	-	CP 5	2075	-	-	-	-
Média	2079,40	2070,00		2073,40		2074,20		2070,40	
Desvio Padrão	17,60	16,87		18,93		18,50		15,42	

Tabela B.10.4: Cargas máximas suportadas pelos corpos de prova do CAL 1055 com 500h de tratamento

Corpo de Prova	Fio Central (N)	Corpo de Prova	Coroa 1 (N)	Corpo de Prova	Coroa 2 (N)	Corpo de Prova	Coroa 3 (N)	Corpo de Prova	Coroa 4 (N)
CP 1	1974	FALHA		CP 1	2008	CP 1	2006	CP 1	1987
CP 2	2007	CP 1	1963	FALHA	-	CP 2	2022	CP 2	1981
CP 3	1980	CP 2	1963	CP 2	2008	CP 3	1990	CP 3	1988
FALHA	-	CP 3	2000	CP 3	1980	FALHA	-	FALHA	-
CP 4	1977	CP 4	1975	CP 4	1977	CP 4	1986	FALHA	-
FALHA	-	FALHA	-	CP 5	1977	FALHA	-	FALHA	-
CP 5	1996	CP 5	1968	-	-	CP 5	1983	CP 4	1965
-	-	-	-	-	-	-	-	CP 5	1969
Média	1986,80		1973,80		1990,00		1997,40		1978,00
Desvio Padrão	14,13		15,45		16,48		16,36		10,49

B.11 VALORES DE TOPOGRAFIA DAS FALHAS DO CAL 900MCM

Tabela B.11.1: Distância vertical entre o pico e o vale das falhas do CAL 900MCM como recebido

Corpo de Prova	Fio Central (μm)	Coroa 1 (μm)	Coroa 2 (μm)	Coroa 3 (μm)
CP 1	2110,8	1808,9	2494,6	2071,9
CP 2	1836,8	2119,6	2355	2015,5
CP 3	2344,6	2891,2	1454,6	2245,7
CP 4	2455	2455,5	3102,3	3456
CP 5	3006,7	2701,2	2903,3	2345,7
Média	2350,78	2395,28	2461,96	2426,96
Desvio Padrão	436,72	436,75	638,77	590,29

Tabela B.11.2: Distância vertical entre o pico e o vale das falhas do CAL 900MCM com 100h de tratamento

Corpo de Prova	Fio Central (μm)	Coroa 1 (μm)	Coroa 2 (μm)	Coroa 3 (μm)
CP 1	2554,4	2402,2	1812,8	2594,3

CP 2	1786,4	2174,4	2006,6	2162,6
CP 3	2119,6	2197,1	2594,3	1454,6
CP 4	2534,5	2467,7	1815,8	2500,6
CP 5	2452,4	2432,2	2500,6	2004,3
Média	2289,46	2334,72	2146,02	2143,28
Desvio Padrão	331,18	138,19	376,23	454,17

Tabela B.11.3: Distância vertical entre o pico e o vale das falhas do CAL 900MCM com 250h de tratamento

Corpo de Prova	Fio Central (μm)	Coroa 1 (μm)	Coroa 2 (μm)	Coroa 3 (μm)
CP 1	2065	1786,9	1708,9	1714,8
CP 2	2079	1926,2	2048,7	2345,7
CP 3	2544,2	2409,7	1815,8	2594,3
CP 4	2004,6	2494,6	2071,9	2110,8
CP 5	2989,9	2245,8	2134,9	2987
Média	2336,54	2172,64	1956,04	2350,52
Desvio Padrão	424,34	306,08	183,54	481,19

Tabela B.11.4: Distância vertical entre o pico e o vale das falhas do CAL 900MCM com 500h de tratamento

Corpo de Prova	Fio Central (μm)	Coroa 1 (μm)	Coroa 2 (μm)	Coroa 3 (μm)
CP 1	2124,2	2077,3	1816,2	2544,2
CP 2	1778,4	1454,6	2015,5	2119,6
CP 3	2323,6	3678,9	3209,8	2111
CP 4	2678,1	2323,4	2345,7	2202,4
CP 5	2366,2	2300,5	2390	2500
Média	2254,1	2366,94	2355,44	2295,44
Desvio Padrão	331,79	812,99	533,28	210,55

B.12 VALORES DE TOPOGRAFIA DAS FALHAS DO CAL 1055

Tabela B.12.1: Distância vertical entre o pico e o vale das falhas do CAL 1055 como recebido

Corpo de Prova	Fio Central (μm)	Coroa 1 (μm)	Coroa 2 (μm)	Coroa 3 (μm)	Coroa 4 (μm)
CP 1	1289,6	1580	1888,1	1839,3	1636,1

CP 2	1169,9	1801,3	1558,7	1779,2	1432,4
CP 3	1829,3	1898,5	1538,5	1603,2	1666,9
CP 4	1700,2	1312,4	1440,6	1467,8	1394,1
CP 5	1322,4	1189,2	1637	1640,4	1409,9
Média	1462,28	1556,28	1612,58	1665,98	1507,88
Desvio Padrão	285,5611	304,9333	169,1712	147,2494	132,2601

Tabela B.12.2: Distância vertical entre o pico e o vale das falhas do CAL 1055 com 100h de tratamento

Corpo de Prova	Fio Central (μm)	Coroa 1 (μm)	Coroa 2 (μm)	Coroa 3 (μm)	Coroa 4 (μm)
CP 1	1829,3	1898,4	1508,6	1607,8	1679,9
CP 2	1953,1	1811,4	1330,7	1454,6	1512,6
CP 3	1210,6	1580	1844,1	1700,1	1436,1
CP 4	1888,5	1701,3	1558,4	1730,2	1562,5
CP 5	1830,9	1898,5	1538,4	1623,2	1566,9
Média	1742,48	1777,92	1556,04	1623,18	1551,6
Desvio Padrão	301,635	137,1303	184,6104	107,268	88,98741

Tabela B.12.3: Distância vertical entre o pico e o vale das falhas do CAL 1055 com 250h de tratamento

Corpo de Prova	Fio Central (μm)	Coroa 1 (μm)	Coroa 2 (μm)	Coroa 3 (μm)	Coroa 4 (μm)
CP 1	1445,6	1355	1962,6	1649,2	1423,6
CP 2	1315	1949,2	1355	1721,7	1384,7
CP 3	1378	1670,9	1334,6	1423,5	1256,7
CP 4	1245,5	1222,6	1456,8	1567,7	1900,4
CP 5	1890,9	1290,5	1223,5	1789,8	1890,4
Média	1455	1497,64	1466,5	1630,38	1571,16
Desvio Padrão	254,7138	305,2972	289,434	142,1587	302,382

Tabela B.12.4: Distância vertical entre o pico e o vale das falhas do CAL 1055 com 500h de tratamento

Corpo de Prova	Fio Central (μm)	Coroa 1 (μm)	Coroa 2 (μm)	Coroa 3 (μm)	Coroa 4 (μm)
CP 1	1728,2	1382,6	1476,6	1467	1394,1
CP 2	1322,4	1318,2	1637	1636,1	1888,1

CP 3	1729,9	1556,2	1234	1455,6	1278,8
CP 4	1445,6	1233,3	1672,9	1233,5	1555,7
CP 5	1134,5	1287,9	1779,2	1200,1	1109,1
Média	1472,12	1355,64	1559,94	1398,46	1445,16
Desvio Padrão	259,3907	124,4073	212,1059	180,9654	296,4937

B.13 DIÂMETRO DAS ESTRICÇÕES DA REGIÃO DE FRATURA DO CAL 900MCM

Tabela B.13.1: Diâmetro das estricções do CAL 900MCM como recebido

Corpo de Prova	Fio Central (μm)	Coroa 1 (μm)	Coroa 2 (μm)	Coroa 3 (μm)
CP 1	2844,1	2797,9	2887,1	2794,9
CP 2	2810,9	2771,1	2752,4	2888,5
CP 3	2785,7	2905,8	2870,0	2832,8
CP 4	2937,8	2804,2	2825,3	2873,2
CP 5	2930,6	2826,2	2795,3	2802,2
Média	2.861,80	2.821,05	2.826,01	2.838,31
Desvio Padrão	69,27	51,30	54,84	41,68

Tabela B.13.2: Diâmetro das estricções do CAL 900MCM com 100h de tratamento

Corpo de Prova	Fio Central (μm)	Coroa 1 (μm)	Coroa 2 (μm)	Coroa 3 (μm)
CP 1	2556,6	2686,2	2623,9	2585,1
CP 2	2666,6	2666,0	2633,1	2689,5
CP 3	2557,2	2601,7	2563,3	2657,7
CP 4	2668,1	2580,3	2607,5	2612,3
CP 5	2665,2	2552,2	2625,6	2590,9
Média	2.622,73	2.617,28	2.610,68	2.627,09
Desvio Padrão	60,12	56,97	28,08	45,08

Tabela B.13.3: Diâmetro das estricções do CAL 900MCM com 250h de tratamento

Corpo de Prova	Fio Central (μm)	Coroa 1 (μm)	Coroa 2 (μm)	Coroa 3 (μm)
CP 1	2573,8	2512,1	2524,2	2517,0
CP 2	2594,2	2524,2	2592,3	2591,9
CP 3	2551,3	2517,2	2595,9	2560,1

CP 4	2540,2	2570,1	2502,5	2522,5
CP 5	2576,2	2591,4	2568,4	2593,5
Média	2.567,14	2.543,00	2.556,67	2.557,00
Desvio Padrão	21,41	35,52	41,61	36,60

Tabela B.13.4: Diâmetro das estricções do CAL 900MCM com 500h de tratamento

Corpo de Prova	Fio Central (μm)	Coroa 1 (μm)	Coroa 2 (μm)	Coroa 3 (μm)
CP 1	2455,6	2517,4	2451,4	2538,7
CP 2	2521,6	2509,3	2516,1	2536,4
CP 3	2536,1	2541,5	2452,2	2476,3
CP 4	2483,1	2485,8	2536,0	2495,4
CP 5	2546,2	2549,5	2546,3	2497,8
Média	2.508,54	2.520,72	2.500,40	2.508,93
Desvio Padrão	38,06	25,59	45,68	27,43

B.14 DIÂMETRO DAS ESTRICÇÕES DA REGIÃO DE FRATURA DO CAL 1055

Tabela B.14.1: Diâmetro das estricções do CAL 1055 como recebido

Corpo de Prova	Fio Central (μm)	Coroa 1 (μm)	Coroa 2 (μm)	Coroa 3 (μm)	Coroa 4 (μm)
CP 1	2346,9	2280,6	2268,6	2293,3	2318,3
CP 2	2293,7	2280,4	2263,8	2320,0	2238,7
CP 3	2276,9	2258,8	2241,7	2294,3	2250,9
CP 4	2302,1	2264,7	2221,0	2242,8	2237,9
CP 5	2262,2	2272,3	2330,7	2202,1	2270,7
Média	2.296,36	2.271,37	2.265,15	2.270,50	2.263,31
Desvio Padrão	32,17	9,63	41,24	47,37	33,45

Tabela B.14.2: Diâmetro das estricções do CAL 1055 com 100h de tratamento

Corpo de Prova	Fio Central (μm)	Coroa 1 (μm)	Coroa 2 (μm)	Coroa 3 (μm)	Coroa 4 (μm)
CP 1	2146,2	2192,4	2158,5	2120,3	2133,1
CP 2	2098,6	2102,2	2181,6	2134,0	2129,7
CP 3	2152,4	2140,6	2159,1	2149,1	2168,6
CP 4	2143,1	2137,6	2107,3	2158,1	2181,7
CP 5	2095,2	2134,4	2193,9	2101,6	2125,1
Média	2.127,11	2.141,44	2.160,06	2.132,60	2.147,66

Desvio Padrão	27,81	32,41	33,14	22,57	25,70
---------------	-------	-------	-------	-------	-------

Tabela B.14.3: Diâmetro das estricções do CAL 1055 com 250h de tratamento

Corpo de Prova	Fio Central (μm)	Coroa 1 (μm)	Coroa 2 (μm)	Coroa 3 (μm)	Coroa 4 (μm)
CP 1	2054,2	2095,9	2127,9	2111,3	2082,2
CP 2	2052,9	2074,7	2096,0	2141,2	2094,9
CP 3	2100,6	2097,1	2069,4	2143,5	2153,6
CP 4	2062,0	2119,5	2106,7	2081,3	2110,3
CP 5	2130,8	2070,6	2075,3	2055,3	2101,3
Média	2.080,08	2.091,57	2.095,07	2.106,52	2.108,47
Desvio Padrão	34,39	19,69	23,81	38,25	27,25

Tabela B.14.4: Diâmetro das estricções do CAL 1055 com 500h de tratamento

Corpo de Prova	Fio Central (μm)	Coroa 1 (μm)	Coroa 2 (μm)	Coroa 3 (μm)	Coroa 4 (μm)
CP 1	1917,3	2043,6	1903,3	2010,2	1909,9
CP 2	1916,3	1981,2	2012,6	1989,2	1958,2
CP 3	1921,0	1962,6	1944,0	1913,8	2024,1
CP 4	1953,9	2043,0	1977,8	1995,1	1982,0
CP 5	1983,5	1989,8	1960,4	2025,8	1901,3
Média	1.938,37	2.004,04	1.959,62	1.986,83	1.955,09
Desvio Padrão	29,63	37,18	40,50	43,21	51,07

B.15 ERROS ASSOCIADOS AS MEDIÇÕES DE CARGA MÁXIMA DO 900MCM

Tabela B.15.1: Erro das medições de carga máxima do 900MCM sem tratamento

Corpo de Prova	Fio Central (N)	Coroa 1 (N)	Coroa 2 (N)	Coroa 3 (N)
CP 1	18,81	19,58	19,46	18,98
CP 2	18,81	19,82	19,68	19,09
CP 3	18,82	20,36	19,46	18,97
CP 4	18,75	19,81	19,45	19,18
CP 5	18,73	20,51	19,64	18,98
Erro da Média	18,79	20,02	19,54	19,04

Tabela B.15.2: Erro das medições de carga máxima do 900MCM com 100h de tratamento

Corpo de Prova	Fio Central (N)	Coroa 1 (N)	Coroa 2 (N)	Coroa 3 (N)
CP 1	15,33	15,85	15,51	15,52
CP 2	15,39	15,67	15,43	15,48
CP 3	15,35	15,71	15,53	15,06
CP 4	15,32	15,93	15,54	15,50
CP 5	15,30	15,89	15,54	15,54
Erro da Média	15,34	15,81	15,51	15,42

Tabela B.15.3: Erro das medições de carga máxima do 900MCM com 250h de tratamento

Corpo de Prova	Fio Central (N)	Coroa 1 (N)	Coroa 2 (N)	Coroa 3 (N)
CP 1	14,34	14,62	14,18	14,36
CP 2	14,30	14,39	14,32	14,31
CP 3	14,27	14,25	14,17	14,24
CP 4	14,25	14,40	14,39	14,24
CP 5	14,28	14,15	14,34	14,42
Erro da Média	14,29	14,36	14,28	14,31

Tabela B.15.4: Erro das medições de carga máxima do 900MCM com 500h de tratamento

Corpo de Prova	Fio Central (N)	Coroa 1 (N)	Coroa 2 (N)	Coroa 3 (N)
CP 1	13,57	13,70	13,68	13,57
CP 2	13,55	13,71	13,72	13,62
CP 3	13,61	13,70	13,67	13,62
CP 4	13,53	13,79	13,72	13,56
CP 5	13,54	13,67	13,66	13,57
Erro da Média	13,56	13,71	13,69	13,59

B.16 ERROS ASSOCIADOS AS MEDIÇÕES DE CARGA MÁXIMA DO CAL 1055

Tabela B.16.1: Erros associados as medições de carga máxima do CAL 1055 como recebido

Corpo de Prova	Fio Central (N)	Coroa 1 (N)	Coroa 2 (N)	Coroa 3 (N)	Coroa 4 (N)
CP 1	14,00	13,86	13,74	13,95	13,62
CP 2	13,92	13,87	13,65	13,88	13,66

CP 3	13,97	13,90	13,76	13,95	13,81
CP 4	13,92	13,76	13,76	13,87	13,64
CP 5	13,95	13,85	13,76	13,90	13,64
Média	13,95	13,85	13,73	13,91	13,67

Tabela B.16.2: Erros associados as medições de carga máxima do CAL 1055 com 100h de tratamento

Corpo de Prova	Fio Central (N)	Coroa 1 (N)	Coroa 2 (N)	Coroa 3 (N)	Coroa 4 (N)
CP 1	11,18	11,10	11,14	11,16	11,36
CP 2	11,25	11,10	11,01	11,13	11,27
CP 3	11,28	11,16	11,05	11,29	11,29
CP 4	11,20	11,12	11,05	11,15	11,28
CP 5	11,21	11,19	11,08	11,19	11,32
Média	11,22	11,13	11,06	11,18	11,30

Tabela B.16.3: Erros associados as medições de carga máxima do CAL 1055 com 250h de tratamento

Corpo de Prova	Fio Central (N)	Coroa 1 (N)	Coroa 2 (N)	Coroa 3 (N)	Coroa 4 (N)
CP 1	10,53	10,40	10,51	10,44	10,39
CP 2	10,37	10,29	10,35	10,50	10,27
CP 3	10,44	10,26	10,25	10,32	10,34
CP 4	10,33	10,47	10,36	10,32	10,47
CP 5	10,32	10,34	10,38	10,28	10,31
Média	10,40	10,35	10,37	10,37	10,35

Tabela B.16.4: Erros associados as medições de carga máxima do CAL 1055 com 500h de tratamento

Corpo de Prova	Fio Central (N)	Coroa 1 (N)	Coroa 2 (N)	Coroa 3 (N)	Coroa 4 (N)
CP 1	9,87	9,82	10,04	10,03	9,94
CP 2	10,04	9,82	10,04	10,11	9,91
CP 3	9,90	10,00	9,90	9,95	9,94
CP 4	9,89	9,88	9,89	9,93	9,83
CP 5	9,98	9,84	9,89	9,92	9,85
Média	9,93	9,87	9,95	9,99	9,89

B.17 ERRO ASSOCIADO AS MEDIÇÕES DE TOPOGRAFIA DA FALHA DO 900MCM

Tabela B.17.1: Erro da medição da distância vertical entre o pico e o vale das falhas do CAL 900MCM como recebido

Corpo de Prova	Fio Central (μm)	Coroa 1 (μm)	Coroa 2 (μm)	Coroa 3 (μm)
CP 1	21,3	18,3	25,1	20,9
CP 2	18,6	21,4	23,8	20,4
CP 3	23,6	29,1	14,7	22,7
CP 4	24,8	24,8	31,2	34,8
CP 5	30,3	27,2	29,2	23,7
Média	23,7	24,2	24,8	24,5

Tabela B.17.2: Erro da medição da distância vertical entre o pico e o vale das falhas do CAL 900MCM com 100h de tratamento

Corpo de Prova	Fio Central (μm)	Coroa 1 (μm)	Coroa 2 (μm)	Coroa 3 (μm)
CP 1	25,7	24,2	18,3	26,1
CP 2	18,1	21,9	20,3	21,8
CP 3	21,4	22,2	26,1	14,7
CP 4	25,5	24,9	18,4	25,2
CP 5	24,7	24,5	25,2	20,2
Média	23,1	23,5	21,7	21,6

Tabela B.17.3: Erro da medição da distância vertical entre o pico e o vale das falhas do CAL 900MCM com 250h de tratamento

Corpo de Prova	Fio Central (μm)	Coroa 1 (μm)	Coroa 2 (μm)	Coroa 3 (μm)
CP 1	20,9	18,1	17,3	17,3
CP 2	21,0	19,5	20,7	23,7
CP 3	25,6	24,3	18,4	26,1
CP 4	20,2	25,1	20,9	21,3
CP 5	30,1	22,7	21,5	30,1
Média	23,6	21,9	19,8	23,7

Tabela B.17.4: Erro da medição da distância vertical entre o pico e o vale das falhas do CAL 900MCM com 500h de tratamento

Corpo de Prova	Fio Central (μm)	Coroa 1 (μm)	Coroa 2 (μm)	Coroa 3 (μm)
CP 1	21,4	21,0	18,4	25,6
CP 2	18,0	14,7	20,4	21,4
CP 3	23,4	37,0	32,3	21,3
CP 4	27,0	23,4	23,7	22,2
CP 5	23,9	23,2	24,1	25,2
Média	22,7	23,9	23,8	23,2

B.18 ERROS ASSOCIADOS AS MEDIÇÕES DE TOPOGRAFIA DA FALHA DO CAL 1055

Tabela B.18.1: Erros associados as medições de topografia do CAL 1055 sem tratamento

Corpo de Prova	Fio Central (μm)	Coroa 1 (μm)	Coroa 2 (μm)	Coroa 3 (μm)	Coroa 4 (μm)
CP 1	13,1	16,0	19,1	18,6	16,6
CP 2	11,9	18,2	15,8	18,0	14,5
CP 3	18,5	19,2	15,6	16,2	16,9
CP 4	17,2	13,3	14,6	14,9	14,1
CP 5	13,4	12,1	16,6	16,6	14,3
Média	14,8	15,8	16,3	16,9	15,3

Tabela B.18.2: Erros associados as medições de topografia do CAL 1055 com 100h de tratamento

Corpo de Prova	Fio Central (μm)	Coroa 1 (μm)	Coroa 2 (μm)	Coroa 3 (μm)	Coroa 4 (μm)
CP 1	18,5	19,2	15,3	16,3	17,0
CP 2	19,7	18,3	13,5	14,7	15,3
CP 3	12,3	16,0	18,6	17,2	14,6
CP 4	19,1	17,2	15,8	17,5	15,8
CP 5	18,5	19,2	15,6	16,4	15,9
Média	17,6	18,0	15,8	16,4	15,7

Tabela B.18.3: Erros associados as medições de topografia do CAL 1055 com 250h de tratamento

Corpo de Prova	Fio Central (μm)	Coroa 1 (μm)	Coroa 2 (μm)	Coroa 3 (μm)	Coroa 4 (μm)
----------------	-------------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------

CP 1	14,7	13,8	19,8	16,7	14,4
CP 2	13,4	19,7	13,8	17,4	14,0
CP 3	14,0	16,9	13,5	14,4	12,8
CP 4	12,7	12,4	14,8	15,9	19,2
CP 5	19,1	13,1	12,4	18,1	19,1
Média	14,8	15,2	14,9	16,5	15,9

Tabela B.18.4: Erros associados as medições de topografia do CAL 1055 com 500h de tratamento

Corpo de Prova	Fio Central (μm)	Coroa 1 (μm)	Coroa 2 (μm)	Coroa 3 (μm)	Coroa 4 (μm)
CP 1	17,5	14,0	15,0	14,9	14,1
CP 2	13,4	13,4	16,6	16,6	19,1
CP 3	17,5	15,8	12,5	14,8	13,0
CP 4	14,7	12,5	16,9	12,5	15,8
CP 5	11,5	13,1	18,0	12,2	11,3
Média	14,9	13,8	15,8	14,2	14,7

B.19 ERRO ASSOCIADO AS MEDIDAS DAS MÉDIAS DOS LIMITES DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DOS CONDUTORES

Tabela B.19: Erros associados as médias de resistência à tração dos condutores

Modelo do Condutor	Tratamento Térmico	Fio Central (MPa)	Coroa 1 (MPa)	Coroa 2 (MPa)	Coroa 3 (MPa)	Coroa 4 (MPa)
900MCM	-	0,02	0,01	0,01	0,02	-
	100h	0,02	0,02	0,02	0,02	-
	250h	0,02	0,02	0,02	0,02	-
	500h	0,02	0,02	0,02	0,02	-
1055	-	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
	100h	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
	250h	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
	500h	0,06	0,06	0,05	0,05	0,06

Apêndice C – Fotos

C.1 ESPECIFICAÇÕES DA BOBINA DO CAL 1055

Nexans
AV AFFONSO PANSAN, 4005 (km 128 VIA ANHANGUERA)
CEP: 13474-901 - AMERICANA - SP - www.nexans.com.br
TEL.: (0XX19) 3471-8605 - FAX: (0XX19) 3471-8606
CNPJ: 31.860.364/0012-28 - Insc. Estadual: 165.373.372.114

Produto/Product		Tipo/Type	
CAL LIGA 6201 1055 KCM 61F			
Condutor/Conductor	Zinc.	Isolacao/Insulation	
CAL (AAAC)			
Cobertura/Jacket	Norma/Specification	OP	
	NBR 10298	00001162512A	
Tensao/Voltage	Dimensao/Dimension	Volume	
	1750 MM X 1152 MM	3,528 M3	
Massa Bruta/Gross	Massa Liq./Net Weight	Tara/Tare	
925,33 KG	733,15 KG	192,18 KG	
Cliente/Customer	Designacao/Designation		
FUNDACAO DE APOIO A PESQUISA			
Destino/Destination	OV		
GOIANIA	142116		
OC/Customer P. O.	Fabr./Manufact.	Cod. Lance Cliente	
AF 025330	02/2015		
Obs. Pos.: 510 / EMBARQUE Fech: T			

Bobina/Reel
SH07971658
Lance/Lenght
500 m
Cod Material/Mat.Code
67875

Made in Brazil Ind. Brasileira Nexans Brasil S/A

Figura C.1: Especificações da bobina do CAL 1055

C.2 ESPECIFICAÇÕES DA BOBINA DO CAL 900MCM

Nexans FICAP
AV AFFONSO PANSAN, 4005 (km 128 VIA ANHANGUERA)
CEP: 13474-901 - AMERICANA - SP - www.nexans.com.br
TEL.: (0XX19) 3471-8605 - FAX: (0XX19) 3471-8606
CNPJ: 31.860.364/0012-28 - Insc. Estadual: 165.373.372.114

Produto/Product		Tipo/Type	
CAL LIGA 6201 900 MCM 37F			
Condutor/Conductor	Zinc.	Isolacao/Insulation	
CAL (AAAC)			
Cobertura/Jacket	Norma/Specification	OP	
	NBR 10298	000136172/00010	
Tensao/Voltage	Dimensao/Dimension	Volume	
	1300 MM X 826 MM	1,395 M3	
Massa Bruta/Gross	Massa Liq./Net Weight	Tara/Tare	
944,18 KG	834,42 KG	109,76 KG	
Cliente/Customer	Designacao/Designation		
FUND.EMPREEND.CIENTIF. TECNOLOGICOS			
Destino/Destination	OV		
BRASILIA	000136172/00010		
OC/Customer P. O.	Fabr./Manufact.	Cod. Lance Cliente	
PEDIDO 01010/13	05/2014	26052	
Obs. Pos.: 510 / EMBARQUE Fech: T			

Bobina/Reel
SH05911889
Lance/Lenght
667 m
Codigo do material
67458

(010788837183010310108000337938)

Figura C.2: Especificações da bobina do CAL 900MCM